

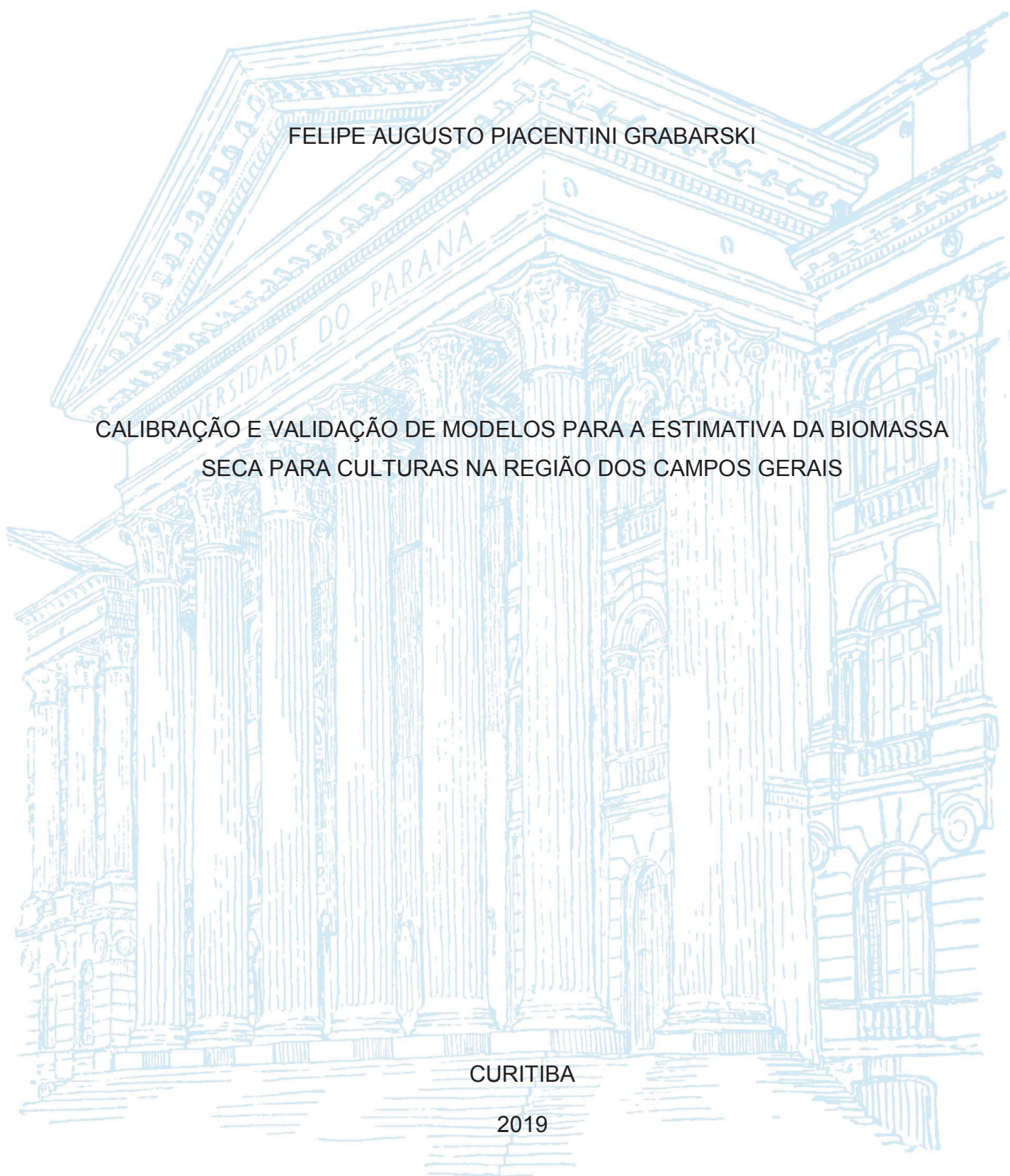
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

FELIPE AUGUSTO PIACENTINI GRABARSKI

CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DE MODELOS PARA A ESTIMATIVA DA BIOMASSA
SECA PARA CULTURAS NA REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS

CURITIBA

2019



FELIPE AUGUSTO PIACENTINI GRABARSKI

CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DE MODELOS PARA A ESTIMATIVA DA BIOMASSA
SECA PARA CULTURAS NA REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração em Qualidade, manejo e conservação do solo e da água, Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luiz Moretti de Souza.

Co-orientador: Prof. Dr. Volnei Pauletti

CURITIBA

2019

G727c Grabarski, Felipe Augusto Piacentini
Calibração e validação de modelos para a estimativa da
biomassa seca para culturas na região dos Campos Gerais /
Felipe Augusto Piacentini Grabarski. - Curitiba, 2019.
104 p.: il.,

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná. Setor
de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciências
do Solo.
Orientador: Jorge Luiz Moretti De Souza
Coorientador: Volnei Pauletti

1. Biomassa. 2. Milho. 3. Soja. 4. Cevada. 5. Trigo. I.
Souza, Jorge Luiz Moretti De (Orientador). II. Pauletti, Volnei
(Coorientador). III. Título. IV. Universidade Federal do Paraná.

CDU 620.91(816.2)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR SETOR DE CIÊNCIAS AGRARIAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO CIÊNCIAS DO SOLO -
40001016014P4


TERMO DE APROVAÇÃO


Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIAS DO SOLO da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de FELIPE AUGUSTO PIACENTINI GRABARSKI intitulada: **CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DE MODELOS PARA A ESTIMATIVA DA BIOMASSA SECA PARA CULTURAS NA REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS**, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APPROVAÇÃO no rito de defesa.

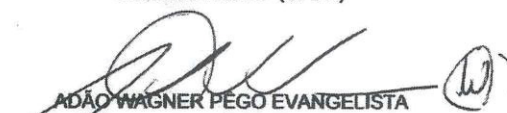
A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 28 de Fevereiro de 2019.


JORGE LUIZ MORETTI DE SOUZA
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)


JOSÉ LUIS CAMARGO ZAMBON
Avaliador Externo (UFPR - DFF)


VOLNEI PAULETTI
Avaliador Interno (UFPR)


ADÃO WAGNER PEGO EVANGELISTA
Avaliador Externo (UFG)

AGRADECIMENTOS

- A Deus, pela graça de nos conceder a vida;
- Aos meus pais, Rene Grabarski e Nelci Piacentini Grabarski, e a minha irmã, Mariana Piacentini Grabarski, por sempre me apoiarem em toda minha vida e, principalmente, nessa caminhada;
- A minha esposa, Ana Paula Navarro Frétola Grabarski, pelo companheirismo, apoio e ajuda em todos os momentos difíceis e nas horas que mais precisei;
- A Universidade Federal do Paraná e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, pelo apoio e oportunidade de estudo ao longo desses dois anos de jornada;
- Ao Professor Dr. Jorge Luiz Moretti de Souza, pela confiança, honestidade e hombridade, todo esse tempo, e por sua grande ajuda;
- Ao Professor Dr. Volnei Pauletti, pelos dados gentilmente fornecidos para a realização deste trabalho;
- Aos meus colegas e amigos, que sempre caminhamos juntos em todas as fases dentro e fora das salas de aula, por mais árduo que fosse;
- A todos que, de alguma forma contribuíram e deram todo apoio para a realização deste trabalho.

RESUMO

Teve-se por objetivo no presente trabalho calibrar e validar modelos recomendados para estimar a produtividade de biomassa seca de cultivos de verão (milho e soja) e inverno (cevada e trigo), na região dos Campos Gerais, Estado do Paraná, tendo como variáveis a radiação solar incidente (R_s), graus dias acumulados (GDA), dias após o plantio (DAP) e precipitação (P). Os experimentos foram realizados nas estações experimentais da Fundação ABC, nas safras 2006/2007 e 2007/2008, para os cultivos de verão, e safras 2007 e 2008, para os cultivos de inverno, em Castro e Ponta Grossa. O trabalho foi estruturado em dois capítulos em que foram coletadas amostras de planta inteira, em quatro estádios fenológicos das culturas, para obtenção da biomassa seca. Os dados climáticos necessários são das estações agrometeorológicas próximas às áreas experimentais. O ajuste dos parâmetros foi realizado com o Método dos Mínimos Quadrados e Ferramenta *Solver* de uma planilha eletrônica. Safras que tiveram maior GDA , DAP , R_s e P para atingir o estágio de maturação fisiológica, de forma geral, não foram as que obtiveram maior produtividade final de biomassa seca. Os parâmetros dos seis modelos testados permitem ajuste e calibração entre produtividades de biomassa seca da soja, milho, trigo e cevada, ao longo da safra com as variáveis DAP , GDA , R_s e P . Não foi possível estabelecer parâmetros únicos para os modelos, respectivos a cada cultura, no processo de ajuste e calibração. Mesmo ajustados, os parâmetros “a” dos modelos testados foram similares à produtividade de biomassa seca no estágio final de cada safra das culturas testadas. Para não apresentar resultados inconsistentes, os parâmetros “a”, “b” e “c” em algumas análises (11,6%) tiveram de ser condicionadas no processo de ajuste e calibração, impondo limitação, dificuldade e imprecisão. O parâmetro “b” está ligado à forma das curvas dos modelos, sendo que seus valores foram maiores para maiores valores das variáveis descritoras, e mais distante a curva dos modelos ficou do eixo “y”. O parâmetro “b” teve maior variabilidade que os parâmetros “a” e “c”. O parâmetro “c” influencia a escala de cada variável e os valores obtidos nos ajustes e calibração foram muito pequenos e sensíveis (“c” < 0,1 predominantemente). A variabilidade da precipitação pluviométrica resultou em falta ou excesso de chuva em determinados períodos das safras e foi a causa que mais influenciou no ajuste dos parâmetros “c” dos modelos. Os ajustes entre as variáveis testadas e a produção de biomassa seca foram bem estreitos para a maioria das safras analisadas na calibração. Contudo, os erros absolutos e relativos foram altos, mesmo tendo desempenhos das análises variando entre “péssimo” a “ótimo”, com predominância de “muito bom”.

Palavras chave: Culturas agrícolas, Biomassa seca, Modelos de crescimento, Desempenho.

ABSTRACT

The objective of this study was to calibrate and validate models recommended to estimate the dry biomass yield of summer (maize and soybean) and winter (barley and wheat) crops in the Campos Gerais region, Paraná State, with the variables: incident solar radiation (R_s), growing degree days (GDD), days after planting (DAP) and precipitation (P). The experiments were carried out at the experimental stations of the ABC Foundation, in the 2006/2007 and 2007/2008 seasons, for summer crops, and 2007 and 2008, for winter crops, in the cities of Castro and Ponta Grossa. The manuscript is structured in two chapters in which samples of whole plant were collected in four phenological stages of the plants, to obtain dry biomass. The required climatic data are from agrometeorological stations near the experimental areas. The parameter adjustment was performed using the Least Squares Method and *Solver* tool of a spreadsheet. Harvests that had higher GDD , DAP , R_s and P to reach the physiological maturation stage, were not generally those that obtained higher final yield of dry biomass. The parameters of the six models tested allowed adjustment and calibration between dry biomass yields of soybean, maize, wheat and barley during the harvest with the variables DAP , GDD , R_s and P . It was not possible to establish single parameters for the respective models to each crop, in the process of adjustment and calibration. Even adjusted, the "a" parameters from tested models were similar to the dry biomass yield at the final stage of each crop among all crops tested. In order to avoid inconsistent results, the parameters "a", "b" and "c" in some analysis (11.6%) had to be conditioned in the adjustment and calibration process, imposing limitation, difficulty and imprecision. The parameter "b" is linked to the shape of the curves of the models, and their values were higher for larger values of the descriptor variables, leading to curves further away from "y" axis. The parameter "b" had greater variability than the parameters "a" and "c". The parameter "c" influenced the scale of each variable, and the values obtained in the adjustments and calibration were very small and sensitive ("c" < 0.1 predominantly). The rainfall variability, resulted in lack or excess of rain during certain periods of the harvest, and it was the cause that most influenced the adjustment of the "c" parameters of the models. The adjustments between the variables tested and the production of dry biomass were very close for most harvests analyzed in the calibration. However, the absolute and relative errors were high, even though the analyzes ranged from "very poor" to "great", with a predominance of "very good".

Keywords: Agricultural crops, Dry biomass, Growth models, Performance.

SUMÁRIO

| | | |
|---------|---|----|
| 1 | INTRODUÇÃO GERAL | 9 |
| 1.1 | REFERÊNCIAS | 14 |
| 2 | CAPÍTULO I – CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DE MODELOS PARA A ESTIMATIVA DA BIOMASSA SECA PARA CULTURAS DE VERÃO NA REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS: MILHO E SOJA | 16 |
| 2.1 | RESUMO | 16 |
| 2.2 | ABSTRACT | 17 |
| 2.3 | INTRODUÇÃO | 18 |
| 2.4 | MATERIAL E MÉTODOS | 20 |
| 2.4.1 | Análises Estatísticas | 24 |
| 2.5 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 25 |
| 2.5.1 | Biomassa seca real e variáveis de entrada nos modelos | 25 |
| 2.5.2 | Calibração dos modelos testados | 28 |
| 2.5.2.1 | Calibração dos modelos para a cultura da soja | 28 |
| 2.5.2.2 | Calibração dos modelos para a cultura do milho | 31 |
| 2.5.3 | Validação dos modelos testados | 35 |
| 2.5.3.1 | Validação dos modelos para a cultura da soja | 35 |
| 2.5.3.2 | Validação dos modelos para a cultura do milho | 37 |
| 2.6 | CONCLUSÕES | 39 |
| 2.7 | REFERÊNCIAS | 40 |
| 3 | CAPÍTULO II – CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DE MODELOS PARA A ESTIMATIVA DA BIOMASSA SECA PARA CULTURAS DE INVERNO NA REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS: TRIGO E CEVADA | 44 |
| 3.1 | RESUMO | 44 |
| 3.2 | ABSTRACT | 45 |
| 3.3 | INTRODUÇÃO | 46 |
| 3.4 | MATERIAL E MÉTODOS | 47 |
| 3.4.1 | Análises Estatísticas | 50 |
| 3.5 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 52 |
| 3.5.1 | Biomassa seca real e variáveis de entrada nos modelos | 52 |
| 3.5.2 | Calibração dos modelos testados | 55 |
| 3.5.2.1 | Calibração dos modelos para a cultura do trigo | 55 |
| 3.5.2.2 | Calibração dos modelos para a cultura da cevada | 57 |
| 3.5.3 | Validação dos modelos testados | 60 |
| 3.5.3.1 | Validação dos modelos para a cultura do trigo | 60 |
| 3.5.3.2 | Validação dos modelos para a cultura da cevada | 63 |
| 3.6 | CONCLUSÕES | 66 |
| 3.7 | REFERÊNCIAS | 66 |
| 4 | CONCLUSÕES GERAIS | 69 |
| 5 | CONSIDERAÇÕES GERAIS | 70 |
| 6 | REFERÊNCIAS GERAIS | 71 |

| | |
|--|----|
| APÊNDICE 1 – REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) ENTRE BIOMASSA SECA ESTIMADA (Y_s) vs OBSERVADA (Y_r) NAS SAFRAS UTILIZADAS PARA CALIBRAÇÃO DA CULTURA SOJA, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS | 77 |
| APÊNDICE 2 – REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) ENTRE BIOMASSA SECA ESTIMADA (Y_s) vs OBSERVADA (Y_r) NAS SAFRAS UTILIZADAS PARA CALIBRAÇÃO DA CULTURA MILHO, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS | 84 |
| APÊNDICE 3 – REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) ENTRE BIOMASSA SECA ESTIMADA (Y_s) vs OBSERVADA (Y_r) NAS SAFRAS UTILIZADAS PARA CALIBRAÇÃO DA CULTURA TRIGO, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS | 91 |
| APÊNDICE 4 – REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) ENTRE BIOMASSA SECA ESTIMADA (Y_s) vs OBSERVADA (Y_r) NAS SAFRAS UTILIZADAS PARA CALIBRAÇÃO DA CULTURA CEVADA, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS | 98 |

1 INTRODUÇÃO GERAL

Nas últimas décadas a produção mundial de alimentos foi suficiente para atender a demanda crescente da população. O Brasil é responsável pelas maiores produções agrícolas do mundo, devido às condições favoráveis de solo, clima e extensão territorial. O país tem conquistado novos mercados em diferentes partes do mundo e mostra grande desempenho nas exportações de produtos do agronegócio. Entre 1990 e 2005, o Brasil aumentou a produção agropecuária de 57 milhões de toneladas de grãos para 115 milhões de toneladas, tendo participação de 4% do comércio mundial. Nos últimos anos, o crescimento das exportações agrícolas está acima de 6%, com reais possibilidades de manter esta taxa (Scolari, 2006). Atualmente, a produção brasileira de grãos está estimada em 229,7 milhões de toneladas na safra 2017/2018, segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB).

De acordo com o *United States Department of Agriculture* (USDA), Milho, Soja, Trigo e Cevada são os principais grãos produzidos no mundo. A utilização desses cereais é variada, mas principalmente como matéria prima para rações de animais, constituindo fonte de carboidratos e proteínas. O milho é produzido anualmente em maiores quantidades do que qualquer outra cultura. A previsão da produção mundial na safra 2018/2019 é de 1,1 bilhão de toneladas, volume 2,1% maior que a safra 2017/2018. O Brasil é o terceiro maior produtor de milho, com 82 milhões de toneladas produzidos na safra 2017/2018. Várias são as formas de uso, sendo considerado alimento com alto potencial energético devido ao teor de amido. Da produção mundial total de milho, cerca de 70% é utilizado na ração animal, sendo o principal macroingrediente na formulação de rações (Caldarelli e Bacchi, 2012). A soja deve atingir produção anual média de aproximadamente 370 milhões de toneladas na safra 2018/2019, total 0,6% maior que na safra anterior. O Brasil é o segundo maior produtor de soja, com quase 119,8 milhões de toneladas na safra 2017/2018, e o maior exportador mundial do produto. A previsão de produção da cultura do Trigo no mundo para a próxima safra é de 750 milhões de toneladas. O Brasil é pouco expressivo na produção do cereal, alcançando apenas 4,5 milhões de toneladas na última safra. A previsão mundial da produção de Cevada para a

próxima safra é de 170 milhões de toneladas. A safra brasileira para 2018 foi estimada aproximadamente em 430 mil toneladas do grão.

A quantidade de alimentos para suprir a demanda da população mundial aumenta com os anos, devido ao crescimento acelerado. Segundo dados da *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO), até 2050 a população mundial vai atingir 9,8 bilhões de habitantes, exigindo das autoridades mundiais aumento sustentável da produção agrícola. A produção no período deverá crescer 70% para atender as necessidades da população (Bojanic, 2017). Algumas pesquisas realizadas pela FAO indicam que o desafio para reduzir a fome é dificultado pelas crises que abalam o mundo, em que os estoques mundiais de alguns cereais estão mais baixos que o previsto. Em meados de 2010, a produção mundial de cereais caiu 1,1%, enquanto a demanda cresceu 1,9%. Nas últimas décadas, houve enorme crescimento da produção agrícola, porém 80% devem-se ao aumento da produtividade, e apenas 20% é resultado de novas áreas. Logo, muitos investimentos serão necessários para aumentar a produtividade agrícola para garantir a alimentação da humanidade nos próximos anos.

Nesse contexto, a região dos Campos Gerais, no Estado do Paraná, se destaca na agricultura brasileira. Considerando diversos fatores como uso de alta tecnologia e plantio direto, a região apresenta anualmente rendimentos elevados e produtividades de grãos acima da média (Weirich Neto, 2004; Pierri et al., 2016).

Alternativas para aumentar a produtividade das culturas agrícolas consistem em realizar o planejamento das safras e empregar tecnologias e estratégias de manejo adequadas para melhorar os rendimentos e minimizar a degradação dos solos. Entre as cultivares disponíveis no mercado, há grande variação em relação à sensibilidade a época de semeadura e a região de cultivo. Define-se por época de semeadura como o conjunto de fatores que interagem com a planta, gerando variações no rendimento e afetando outras características agronômicas (Peixoto et al., 2000). Além disso, uma espécie vegetal expressa seu potencial produtivo desde que seja manejada em época adequada e de forma correta. A interação entre genótipo e ambiente é fundamental para melhorar o rendimento das culturas. Dessa forma, o estudo e entendimento da tendência da biomassa seca ao longo do ciclo das culturas é uma boa alternativa para entender a produção final de grãos.

Os elementos meteorológicos agem diferentemente em cada local e época, e a precipitação, radiação solar e temperatura do ar influenciam expressivamente a produção de biomassa das plantas (Santos e Campelo Junior, 2003; Berlato et al., 1992). Assim, a identificação e quantificação das relações entre elementos agrometeorológicos e produtividade das culturas agrícolas são fundamentais (Araújo et al., 2014). Para o melhor planejamento e precisão na estimativa de produtividades das culturas é preciso identificar as principais variáveis no ciclo das culturas. Alguns elementos climáticos podem ter maior influência no desenvolvimento das culturas, principalmente nas de ciclo anual.

A radiação solar é variável meteorológica importante nos estudos de necessidade hídrica das culturas, mudanças climáticas e modelagem do crescimento vegetal. É considerada a força para muitos processos que ocorrem no sistema Terra-Atmosfera, como os físico-químicos e biológicos (Borges et al., 2010). A radiação solar incidente (R_s) é transformada em radiação fotossinteticamente ativa interceptada e convertida em biomassa fresca, revelando a eficiência do uso da radiação pelas espécies. Dessa forma, várias pesquisas são desenvolvidas, como análise de crescimento das plantas, potencial de produção e previsão de crescimento (Caron et al., 2016).

Estudos envolvendo a necessidade hídrica das culturas agrícolas vêm sendo desenvolvidas em várias regiões do país. Os dados são relevantes no planejamento agrícola, para alcançar o máximo potencial produtivo. Tais necessidades devem ser atendidas em todo o ciclo das culturas, em seus respectivos estádios fenológicos, desde o pré-plantio até a maturação fisiológica. Contudo, Silva et al. (2009) consideram que somente a precipitação não foi suficiente para estimar a produtividade de culturas de ciclo longo, como abacaxi e cana-de-açúcar. Logo, outros fatores climáticos são necessários para planejar o crescimento e desenvolvimento das culturas. Apesar disso, Pierri et al. (2016) verificaram que a produção residual de biomassa de culturas de ciclo curto (soja, milho, trigo, cevada, e outras) foi influenciada pela precipitação, na região dos Campos Gerais, estado do Paraná. Na safra 2008/2009, 62% da precipitação ficou abaixo da média, ocorrendo menor produção de biomassa comparada com a safra 2009/2010, em que a precipitação foi 22% maior que a média histórica. Cenários de mudanças climáticas indicam alterações significativas nos regimes de precipitação terrestre até o final do

século. Contudo, a intensidade em que os padrões de precipitação influenciam no ecossistema terrestre ainda é incerta (Xu e Wang, 2016). Ospina-Noreña et al., (2017) consideram que a redução da precipitação e umidade do solo podem diminuir as atividades agrícolas, resultando em baixas ou nulas as produtividades e qualidades dos produtos produzidos.

A temperatura ao longo do ciclo da cultura também influencia no acúmulo de biomassa. Tendo em vista cenários de mudanças climáticas, estudos considerando graus dia (*GD*) podem possibilitar boa correspondência para questões ligadas à produtividade de culturas agrícolas anuais. O desenvolvimento das espécies vegetais está relacionado com cada fase fenológica, que é controlada pela soma térmica diária necessária para cada estágio. Dependendo da cultura agrícola e disponibilidade térmica da região, altas temperaturas do ar podem levar a menor produtividade, devido ao aumento da respiração e taxa de desenvolvimento. Contudo, ciclos mais curtos podem ser benéficos para as culturas. Como por exemplo, para que as fases críticas das culturas não sejam atingidas por períodos de secas ou geadas (Fagundes et al., 2010).

A avaliação da influência dos fatores ambientais e climáticos na produção de culturas tem sido mais bem explicada com modelos de simulação de culturas, para melhor estimativa de rendimento (Monteiro e Sentelhas, 2014). Tais modelos têm sido utilizados para identificar o risco climático ligado à cultura, melhorar a época de semeadura e pesquisar lacunas de produção (Confalonieri, 2012). A modelagem dos sistemas agrícolas vem se desenvolvendo desde meados de 1950. A história dos modelos é caracterizada por vários eventos que motivaram cientistas de diversas áreas a desenvolver modelos para distintos propósitos.

Na última década os modelos de sistemas de cultivo agrícola ampliaram-se e atualmente são usados em várias aplicações, como mudanças climáticas, segurança alimentar, aplicativos para agricultores, cultivo de plantas, bioenergia, entre outras. Uma série de eventos e fatores caracterizam a história da modelagem dos sistemas agrícolas. Os primeiros modelos agrícolas surgiram em meados de 1950 e foram realmente concebidos pela primeira vez na década de 1960. Os pioneiros acreditavam que os sistemas agrícolas poderiam ser modelados com uma combinação de princípios físicos e biológicos. No final dos anos 90, houve maiores preocupações com as consequências ambientais causadas pela agricultura. Logo, o

ano 2000 foi marcado pelo interesse em reduzir os efeitos dos gases de efeito estufa (GEE), surgindo modelos ligados a sequestro de carbono, reflorestamento, pecuária e hidrologia. Mais tarde, entre 2005 e 2009, a União Europeia financiou o Sistema de Modelação Ambiental e Agrícola, desenvolvendo modelos para uso em escala. Em 2010, criou-se o Projeto de Intercomparação e Melhoria do Modelo Agrícola, com o intuito de melhorar os modelos, unindo a imaginação e o interesse de modeladores agrícolas de todo o mundo. No mesmo ano, o setor privado interessou-se pelos modelos de sistemas agrícolas, criando suas próprias equipes. Desde então, com o aumento no preço dos alimentos nos anos 2008/2010, e, consequentemente, a necessidade de aumentar a produção de alimentos, está havendo o interesse no uso de novas tecnologias para os modelos, como computação em nuvem, *smartphones*, lojas de aplicativos, computação móvel, entre outras (Jones et al., 2017).

Para compreender o acúmulo de biomassa pelas plantas, a simulação de culturas fundamentada em modelos agrometeorológicos baseia-se nos diferentes estádios fenológicos das plantas, pois o impacto dos fatores climáticos varia com a fase de cultivo (Monteiro e Sentelhas, 2014). Existem vários modelos na literatura, podendo-se mencionar: regressão, correlação, análise multivariada, entre outros. Geralmente, os modelos procuram relacionar duas ou mais variáveis (Araújo et al., 2014), sendo comum utilizar os graus dias acumulados, radiação solar incidente, precipitação e dias após plantio. Nesse contexto, alguns coeficientes são definidos como padrão na literatura, e também podem ser estimados regionalmente, apresentando valores mais confiáveis da biomassa seca total das culturas.

Teve-se por objetivo no presente trabalho calibrar e validar modelos recomendados para estimar a produtividade de biomassa seca de cultivos de verão (milho e soja) e inverno (cevada e trigo), na região dos Campos Gerais, Estado do Paraná, tendo como variáveis a radiação solar incidente (R_s), graus dias acumulados (GDA), dias após o plantio (DAP) e precipitação (P).

O presente trabalho foi estruturado e encontra-se subdividido em dois capítulos:

Capítulo I – Calibração e validação de modelos para a estimativa da biomassa seca para culturas de verão na região dos Campos Gerais: milho e soja;

Capítulo II – Calibração e validação de modelos para a estimativa da biomassa seca para culturas de inverno na região dos Campos Gerais: trigo e cevada.

1.1 REFERÊNCIAS

- ARAUJO, E. C. de; URIBE-OPAZO, M. A.; JOHANN, J. A. Modelo de regressão espacial para estimativa da produtividade da soja associada a variáveis agrometeorológicas na região oeste do estado do Paraná. **Engenharia Agrícola, Jaboticabal**, v. 34, n. 2, p. 286-299, 2014.
- BERLATO, M. A.; FONTANA, D. C.; GONÇALVES, H. M. Relação entre rendimento de grãos de soja e variáveis meteorológicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 27, n. 5, p. 695-702, 1992.
- BOJANIC, A. **7 anos da visão 2050**. Trabalho apresentado no Diálogo: Desafio 2050 e Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, São Paulo, 2017.
- BORGES, V. P.; OLIVEIRA, A. S. de; FILHO, M. A. C.; SILVA, T. S. M. da; PAMPONET, B. M. Avaliação de modelos de estimativa da radiação solar incidente em Cruz das Almas, Bahia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 1, p. 74-80, 2010.
- CALDARELLI, C. E.; BACCHI, M. R. P. Fatores de influência no preço do milho no Brasil. **Nova Economia**, Belo Horizonte, v. 22, n. 1, p. 141-164, 2012.
- CARON, B. O.; SCHMIDT, D.; BALBINOT, R.; BEHLING, A.; ELOY, E.; ELLI, E. F. Efficiency of the use of yerba mate solar radiation in intercropping or monocropping for the accumulation of carbon. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 40, n. 6, p. 983-990, 2016.
- CONFALONIERI, R. Combinando um gerador de clima e um método de análise de sensibilidade padrão para quantificar a relevância das variáveis climáticas e saídas dos modelos agrometeorológicos. **Climatologia teórica e aplicada**, v. 108, n. 1-2, p. 19-30, 2012.
- FAGUNDES, J. D.; PAULA, G. M. DE; LAGO, I.; STRECK, N. A.; BISOGNIN, D. A. Aquecimento global: efeitos no crescimento, no desenvolvimento e na produtividade de batata. **Ciência Rural**, v. 40, n. 6, p. 1464-1472, 2010.
- JONES, J. W.; ANTLE, J. M.; BASSO, B.; BOOTE, K. J.; CONANT, R. T.; FOSTER, I.; GODFRAY, H. C. J.; HERRERO, M.; HOWITT, R. E.; JANSSEN, S.; KEATING, B. A.; CARPENA, R. M.; PORTER, C. H.; ROSENZWEIG, C.; WHEELER, T. R. Brief history of agricultural systems modeling. **Agricultural Systems**, v. 155, p. 240-254, 2017.
- MONTEIRO, L. A.; SENTELHAS, P. C. Calibration and testing of an agrometeorological model for the estimation of soybean yields in different Brazilian regions. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 36, n. 3, p. 265-272, 2014.
- OSPINA-NOREÑA, J. E.; DOMÍNGUEZ-RAMÍREZ, C. A.; VEGA-RODRÍGUEZ, E. E.; DARGHAN-CONTRERAS, A. E.; RODRÍGUEZ-MOLANO, L. E. Analysis of the water balance under regional scenarios of climate change for arid zones of Colombia. **Atmósfera**, v. 30, n. 1, p. 63-76, 2017.

PEIXOTO, C. P., CÂMARA, G. M. de S., MARTINS, M. C., MARCHIORI, L. F. S., GUERZONI, R. A., MATTIAZZI, P. Épocas de semeadura e densidade de plantas de soja: I. Componentes da produção e rendimento de grãos. **Scientia Agrícola**, Piracicaba , v. 57, n. 1, p. 89-96, 2000.

PIERRI, L. D.; PAULETTI, V.; SILVA, D. A. da; SCHERAIBER, C. F.; SOUZA, J. L. M. de; MUNARO, F. C. Seasonality and potential of energy production from agricultural residual biomass in Campos Gerais, Paraná State. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 63, n. 2, p. 129-137, 2016.

SANTOS, V. S. dos; CAMPELO JUNIOR, J. H. Influência dos elementos meteorológicos na produção de adubos verdes, em diferentes épocas de semeadura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande , v. 7, n. 1, p. 91-98, 2003.

SCOLARI, D. D. G. **Produção agrícola mundial: o potencial do Brasil**. In: VISÃO PROGRESSISTA DO AGRONEGÓCIO BRASILEIRO. Brasília, DF: Fundação Milton Campos, 2006. p. 9-86.

SILVA, L. L. da; COSTA, R. F. da; CAMPOS, J. H. B. da C.; DANTAS, R. T. Influência das precipitações na produtividade agrícola no Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v.13, n.4, p. 454-461, 2009.

WEIRICH NETO, P. H. **Importância de Atributos Agronômicos para Qualificação da Semeadura do Milho (*Zea mays* L.) no Sistema Plantio Direto na Região dos Campos Gerais-PR**. Tese - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

XU, H.; WANG, X. Effects of altered precipitation regimes on plant productivity in the arid region of northern China. **Ecological Informatics**, v. 31, p. 137-146, 2016.

2 CAPÍTULO I – CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DE MODELOS PARA A ESTIMATIVA DA BIOMASSA SECA PARA CULTURAS DE VERÃO NA REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS: MILHO E SOJA

2.1 RESUMO

Teve-se por objetivo no presente trabalho calibrar e validar modelos recomendados para estimar a produtividade de biomassa seca das culturas milho e soja na região dos Campos Gerais, tendo como variáveis a radiação solar incidente (R_s), graus dias acumulados (GDA), dias após o plantio (DAP) e precipitação (P). Os experimentos foram realizados nas estações experimentais da Fundação ABC, nas safras 2006/2007 e 2007/2008, em Castro e Ponta Grossa, em que foram coletadas amostras de planta inteira, em quatro estádios fenológicos das culturas, para obtenção da biomassa seca das culturas soja e milho. Os dados climáticos necessários são das estações agrometeorológicas próximas às áreas experimentais. O ajuste dos parâmetros foi realizado com o Método dos Mínimos Quadrados e Ferramenta *Solver* de uma planilha eletrônica. Com exceção da variável GDA , safras de soja que tiveram maior DAP , R_s e P para atingir o estágio de maturação fisiológica não foram as que obtiveram maior produtividade final de biomassa seca. O ciclo da cultura da soja diminuiu à medida que a semeadura foi realizada em datas mais tardias. A associação do acúmulo da biomassa seca das culturas e variáveis testadas foi satisfatória na calibração. Com exceção do desempenho dos modelos para a precipitação (entre “péssimo” e “muito bom”) para a cultura da soja e milho, as demais variáveis apresentaram desempenhos promissores entre “mau” e “ótimo”, predominantemente ótimo. A ocorrência de valores negativos de biomassa seca estimada no início das safras com os modelos Brody e Bertalanffy indicou restrição à sua utilização. Mesmo com bons ajustes na calibração para a soja e milho, a validação indicou altos erros absolutos e relativos nas safras.

Palavras-chave: Cultivo Agrícola, Modelos de crescimento, Fatores Ambientais, *Glycine max*, *Zea mays*.

2.2 ABSTRACT

The objective of this study was to calibrate and validate recommended models to estimate the dry biomass yield of maize and soybean crops in the Campos Gerais region, with the following variables: incident solar radiation (R_s), growing degree days (GDD), days after planting (DAP) and precipitation (P). The experiments were carried out in the experimental stations of the ABC Foundation, in the 2006/2007 and 2007/2008 seasons, in Castro and Ponta Grossa cities, where whole plant samples were collected in four phenological stages to obtain the dry biomass of the crops soybean and maize. The required climatic data are from agrometeorological stations near the experimental areas. The parameters adjustment was performed using the Least Squares Method and *Solver* tool from a spreadsheet. Except for the variable GDD , soybean crops that had higher DAP , R_s and P to reach the stage of physiological maturation were not those that obtained higher final yield of dry biomass. The cycle of soybean cultivation decreased as sowing was performed at later dates. The association between dry biomass accumulation from crops and variables analyzed was satisfactory in the calibration process. Except in the performance of the models for precipitation variable (from "bad" to "very good") for soybean and maize crops, the other variables presented promising performances between "bad" and "optimal", predominantly optimum. The occurrence of negative values of dry biomass estimated at the beginning of the seasons with the models Brody and Bertalanffy indicated a restriction to its use. Even with good calibration adjustments for soybean and maize, validation indicated high absolute and relative errors in the crops.

Keywords: Agricultural Production, Growth Models, Environmental Factors, *Glycine max*, *Zea mays*.

2.3 INTRODUÇÃO

Um dos grandes desafios atuais consiste em satisfazer as necessidades alimentares da população mundial com os recursos limitados do planeta, devido a crescente população humana. O termo “intensificação sustentável” consiste no aumento do rendimento das culturas, preservando a capacidade das gerações futuras de usar a terra, minimizando os impactos ambientais. Mas existem obstáculos para a intensificação sustentável, podendo-se destacar fatores, como: *i)* Clima – proporciona ondas de calor e secas, causando falhas na colheita; *ii)* Tecnologia – está limitada ao acesso à técnicas avançadas, equipamentos agrícolas ou variedades de alto rendimento; e, *iii)* Composição – sendo que algumas culturas podem ser mais exigentes nos recursos do que outras (Davis et al., 2016). Vitousek et al., (1997) consideram que a produção global de alimentos pelos humanos é uma das formas mais significativas de modificação dos sistemas naturais. As mudanças devem-se a vários fatores, como a retirada de água de rios para irrigação, emissões de gases de efeito estufa (vindos de cultivos mecanizados, mudança de uso de solo e produção de ruminantes), aplicação de nitrogênio reativo em fertilizantes, entre outros.

O Brasil tem se destacado na produção agrícola nas últimas décadas, devido ao aumento da produtividade, com redução dos impactos ambientais, sem que haja abertura de novas áreas. Logo, o país vem se mostrando promissor para atender as necessidades alimentares globais, sem grandes degradações ambientais. Entre todos os produtos agrícolas que o país produz, os grãos têm grande destaque na economia do país, principalmente os cultivados na safra do verão (Johann et al., 2012). Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), os cultivos de verão, como soja, milho e feijão, são responsáveis por mais de 70% da produção de grãos do país. Em 2017, o Paraná foi responsável por 14,78% da produção nacional da soja e 15,56% do milho. As duas culturas somaram mais de 90% da área total plantada com os cultivos de verão no Estado (IBGE, 2018). A soja é a principal oleaginosa produzida e consumida mundialmente, devido a sua importância para o consumo animal, com o uso do farelo de soja e consumo para alimentação humana (como o óleo), principalmente em regiões de baixa renda. Sua importância cresceu na década de 70, com o aumento das áreas cultivadas e utilização de tecnologias

que geraram incremento da produtividade. Milho e soja são as principais culturas responsáveis pelo agronegócio brasileiro.

Para explorar o máximo potencial produtivo é necessário que alguns fatores estejam de acordo com as exigências das culturas, como clima, manejo de nutrientes e pragas, entre outros. Aspectos do clima como temperatura, precipitação e radiação solar, devem atender as exigências da cultura (Fancelli e Dourado-Neto, 2000), sendo tais fatores os mais influentes no crescimento das plantas. A radiação solar incidente (R_s) é importante em várias áreas, como agronomia, hidrologia, ecologia, fornecimento de energia para processos naturais, estimativa de desempenho, entre outras (Chukwujindu, 2017). A radiação solar é a principal fonte de energia no meio ambiente, sendo fundamental para a fotossíntese e desenvolvimento dos vegetais (Campos et al., 2016). A disponibilidade de luz solar também é importante para estudos fenológicos e o entendimento da adaptação dos vegetais nas condições locais (Santos, 2006). Palencia et al. (2013) consideraram que o entendimento das relações entre radiação solar, temperatura e água no solo são fundamentais para a obtenção de boa qualidade e produtividade das culturas em geral. A deficiência hídrica causa as principais perdas de produtividade nas regiões brasileiras, devido aos veranicos, estiagens e chuvas irregulares em algumas regiões, nas safras de verão. Vários estudos indicam que o período reprodutivo da soja é o mais sensível à necessidade hídrica, porém não identificando o estágio fenológico mais crítico (Fietz e Urchei, 2002). A deficiência hídrica afeta também de diferentes formas a cultura do milho. Costa et al. (2008) obtiveram alterações no crescimento e expansão de área foliar do milho no estágio vegetativo e produção de matéria seca no estágio reprodutivo. Além disso, a exigência em temperatura varia de acordo com a fase de cultivo de ambas as culturas. Para a soja e milho, melhores rendimentos ocorrem com temperaturas entre 20 e 30 °C, com temperatura ideal em torno de 30 °C. Temperaturas abaixo de 10 °C e acima de 40 °C têm efeitos adversos no desenvolvimento das culturas.

Nesse sentido, considera-se que o planejamento agrícola é a melhor opção para atingir o potencial genético de produção máxima. O uso de funções e modelos matemáticos é uma excelente alternativa para estimar a produção vegetal, possibilitando a avaliação da dinâmica do crescimento vegetal e crescimento final das plantas (Peixoto e Peixoto, 2004). Assim, o estudo de sistemas agrícolas

usando modelos e dados que caracterizem como determinado sistema se comporta em circunstâncias específicas é fundamental. Os dados são primordiais para desenvolver, avaliar e executar modelos, visando simular inferências sobre o sistema real. Os modelos permitem a utilização de ferramentas computacionais, que ajudam a identificar as melhores opções e os riscos associados (Jones et al., 2017). A literatura é riquíssima em programas computacionais que utilizam modelos para fazer recomendações específicas como: manejo de pragas, planejamento financeiro, gestão de empresas e manejo geral das culturas.

Diante do contexto apresentado, teve-se por objetivo no presente trabalho calibrar e validar modelos recomendados para estimar a produtividade de biomassa seca das culturas milho e soja na região dos Campos Gerais, tendo como variáveis a radiação solar incidente (R_s), graus dias acumulados (GDA), dias após o plantio (DAP) e precipitação (P).

2.4 MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo localiza-se na Região dos Campos Gerais, Estado do Paraná, em dois municípios: i) Ponta Grossa, contendo Latossolo Vermelho Distrófico típico (EMBRAPA, 2006), textura argilo arenosa (450 g kg^{-1} de argila, 450 g kg^{-1} de areia e 100 g kg^{-1} de silte), relevo suave ondulado e clima subtropical úmido (Cfb), conforme classificação de Köppen. As coordenadas geográficas próximas dos locais dos experimentos são $25^\circ 00' 53'' \text{ S}$ e $50^\circ 09' 07'' \text{ W}$; ii) Castro, contendo Latossolo Bruno Distrófico típico ácrico A proeminente (EMBRAPA/FABC, 2001), textura muito argilosa, declividade de 9,6% e clima local subtropical (Cfb), segundo Köppen. As coordenadas geográficas próximas dos locais dos experimentos são $24^\circ 51' 50'' \text{ S}$ e $49^\circ 56' 25'' \text{ W}$. Ponta Grossa e Castro apresentam, respectivamente, temperatura média de $17,5^\circ \text{C}$ e $16,9^\circ \text{C}$, e precipitação média de 1495 mm e 1553 mm por ano.

Os dados de biomassa seca dos cultivos de soja e milho são de experimentos realizados nos municípios de Ponta Grossa e Castro, nas estações experimentais da Fundação ABC, nas safras 2006/2007 e 2007/2008. Para cada cultura, foram instaladas quatro áreas experimentais (TABELA 2.1).

TABELA 2.1 – NÚMERO DE EXPERIMENTOS CONDUZIDOS POR CULTURA, COM IDENTIFICAÇÃO DA SAFRA E LOCAL DE INSTALAÇÃO.

| Cultura | -----Local/Safra----- | | | | Total |
|---------|-----------------------|---------------------|---------------------------|---------------------------|-------|
| | Castro 2006/2007 | Castro 2007/2008 | Ponta Grossa 2006/2007 | Ponta Grossa 2007/2008 | |
| Milho | 1 | 2 | — | 1 | 4 |
| Soja | 1 | 1 | 1 | 1 | 4 |

FONTE: O autor (2019)

As cultivares utilizadas, datas de semeadura e local de cada safra encontram-se apresentadas na TABELA 2.2. Nas áreas experimentais foram coletadas quatro amostras de plantas inteiras para a determinação da biomassa aérea, nos seguintes estádios fenológicos: vegetativo 4 (V4), vegetativo 8 (V8), pleno florescimento (PF) e maturação fisiológica (MF). As escalas fenológicas utilizadas para as culturas soja e milho foram propostas por Costa e Marchezan (1982) e Ritchie et. al. (1993), respectivamente. Para todas as culturas, as plantas foram coletadas à aproximadamente 1 cm da superfície do solo.

TABELA 2.2 – CULTIVARES E DATA DA SEMEADURA DE ACORDO COM O LOCAL E SAFRA DE CULTIVO.

| Cultura | Cultivar | Local | Safra | Semeadura |
|---------|----------|--------------|-------------|------------|
| Milho | P 30F53 | Castro | 2006/2007 | 28/09/2006 |
| | P 30F53 | Castro | 2007/2008 1 | 04/10/2007 |
| | P 30F53 | Castro | 2007/2008 2 | 10/10/2007 |
| | P 30F53 | Ponta Grossa | 2007/2008 | 03/10/2007 |
| Soja | CD 206 | Castro | 2006/2007 | 15/11/2006 |
| | CD 206 | Ponta Grossa | 2006/2007 | 27/11/2006 |
| | CD 206 | Castro | 2007/2008 | 07/11/2007 |
| | CD 206 | Ponta Grossa | 2007/2008 | 17/10/2007 |

FONTE: O autor (2019)

No último estágio, as plantas foram coletadas e divididas em grãos e biomassa aérea. Após o corte, as plantas foram pesadas a campo para quantificar a biomassa fresca. Todo o material coletado e pesado foi enviado ao laboratório para secagem em estufa a 70 °C até peso constante, para quantificação da biomassa seca, para os dois primeiros estádios fenológicos. Para os dois estádios finais, devido ao volume de material coletado, uma amostra de plantas inteiras que foram pesadas frescas foi separada e enviada ao laboratório para devida secagem. Com os dados da biomassa fresca total da área coletada, e com a determinação da umidade da amostra, calculou-se a biomassa por hectare.

No estudo, foram ajustados os parâmetros dos modelos: Streibig (1988), Gompertz e Philos (1825), Ratkowsky (1983), Brody (1945), Bertalanffy (1957) e Garcia e Garcia (2002). O ajuste foi realizado com o Método dos Mínimos Quadrados e Ferramenta *Solver* de uma planilha eletrônica. Após o ajuste individual para cada safra, verificou-se o desempenho dos modelos e selecionaram-se os melhores, sendo realizada a calibração com pelo menos três safras de locais e anos diferentes. Posteriormente, foi realizada a validação de cada modelo com safras não utilizadas na calibração

- Calibração para a soja: Safras “Castro 2006/2007”, “Ponta Grossa 2006/2007” e “Ponta Grossa 2007/2008”;
- Calibração para o milho: “Castro 2006/2007”, “Castro 2007/2008a” e “Ponta Grossa 2007/2008”;
- Validação para a soja: Safra “Castro 2007/2008”;
- Validação para o milho: “Castro 2007/2008b”.

Os modelos consideram a entrada das variáveis: dias após o plantio (*DAP*), graus dia acumulados (*GDA*), radiação solar incidente acumulada (*RS*) e precipitação acumulada (*P*). Os dados climáticos foram obtidos em estações climatológicas dispostas próximas aos locais do experimento.

- Modelo logístico não linear, proposto por Streibig (1988):

$$y(x_i) = \frac{a}{\left[1 + \left(\frac{x_i}{c}\right)^b\right]} \quad (2.1)$$

- Modelo não linear, proposto por Gompertz e Philos (1825):

$$y(x_i) = a \cdot \exp[-b \cdot \exp(-c \cdot x_i)] \quad (2.2)$$

- Modelo não linear, proposto por Ratkowsky (1983):

$$y(x_i) = \frac{a}{1 + b \cdot e^{(-c \cdot x_i)}} \quad (2.3)$$

- Modelo não linear, proposto por Brody (1945):

$$y(x_i) = a \cdot (1 - b \cdot e^{(-c \cdot x_i)}) \quad (2.4)$$

– Modelo não linear, proposto por Bertalanffy (1957):

$$y(x_i) = a \cdot \left(1 - b \cdot e^{(-c \cdot x_i)}\right)^3 \quad (2.5)$$

– Modelo do tipo sigmoidal, proposto por Garcia e Garcia (2002):

$$y(x_i) = a \cdot \left\{ \frac{1}{2} \cdot \left[\text{sen} \left(\frac{3 \cdot \pi}{2} + \pi \cdot \frac{x_i}{c} \right) + 1 \right] \right\}^b \quad (2.6)$$

Sendo: $y(x_i)$ – biomassa seca total em função da variável x (kg ha^{-1}); x_i – valor da variável independente, sendo avaliado no presente estudo os i -ésimo dias após o plantio (D ; dia), graus dias acumulados até o i -ésimo dia (GD_i ; $^{\circ}\text{C}$), radiação solar incidente acumulada até o i -ésimo dia (Rs_i ; $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$) e precipitação acumulada até o i -ésimo dia (P_i ; mm dia^{-1}); a , b e c – parâmetros da equação (a : kg ha^{-1} ; b : adimensional; c : mesma unidade da variável independente).

Os graus dias acumulados foram calculados com o somatório:

$$GDA_i = \sum_{i=1}^n GD_i \quad (2.7)$$

Sendo: GDA_i – graus dia acumulados no i -ésimo dia ($^{\circ}\text{C}$); GD_i – graus-dia no i -ésimo dia ($^{\circ}\text{C}$).

Os graus-dia foram calculados com o método proposto por Arnold (1959), que considera apenas a temperatura basal inferior (T_{basal}) no cálculo dos graus-dia:

$$GD_i = \frac{(T_{máx} + T_{mín})}{2} - T_{basal} \quad (2.8)$$

Sendo: GD_i – graus-dia no i -ésimo dia ($^{\circ}\text{C}$); $T_{máx_i}$ – temperatura máxima registrada no i -ésimo dia ($^{\circ}\text{C}$); $T_{mín_i}$ – temperatura mínima registrada no i -ésimo dia ($^{\circ}\text{C}$); T_{basal} – temperatura basal inferior da cultura ($^{\circ}\text{C}$).

A temperatura basal (T_{basal}) é a temperatura mínima necessária para ativar processos metabólicos das plantas. Somente acima da T_{basal} há desenvolvimento (Ometto, 1981). Considerou-se no presente trabalho 13 $^{\circ}\text{C}$ e 10 $^{\circ}\text{C}$ as temperaturas mínimas necessárias ao desenvolvimento da soja (INMET, 2009) e milho (Wislie, 1962), respectivamente.

2.4.1 Análises Estatísticas

As associações entre os valores observados (reais) e estimados (com os modelos) foram verificadas em análises de regressão linear simples. Para comparação, foram calculados os erros absolutos (Ea) e relativos (Er), coeficiente de determinação (R^2) e correlação de Pearson (R), índice de concordância “ d ” (Willmott et al., 1985), que indica como os pontos medidos e estimados estão afastados da reta 1:1, e índice “ c ” (Camargo e Sentelhas, 1997), que mede o desempenho do modelo:

$$Ea = \frac{\sum_{i=1}^n |Y_{o_i} - Y_{e_i}|}{n} \quad (2.9)$$

$$Er = \frac{\sum_{i=1}^n |Y_{o_i} - Y_{e_i}|}{\sum_{i=1}^n Y_{e_i}} \cdot 100 \quad (2.10)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n [(Y_{o_i} - \bar{Y}_o) \cdot (Y_{e_i} - \bar{Y}_e)]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_{o_i} - \bar{Y}_o)^2 \cdot \sum_{i=1}^n (Y_{e_i} - \bar{Y}_e)^2}} \quad (2.11)$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{e_i} - Y_{o_i})^2}{\sum_{i=1}^n (|Y_{e_i} - \bar{Y}_o| + |Y_{o_i} - \bar{Y}_e|)^2} \right] \quad (2.12)$$

$$c = d \cdot r \quad (2.13)$$

Sendo: Ea – erro absoluto médio (kg ha^{-1}); Er – erro relativo (%); r – coeficiente de correlação de Pearson (adimensional); d – índice de concordância de Willmott et al. (1985) (adimensional); c – índice “ c ” de desempenho proposto por Camargo e Sentelhas (1997) (adimensional); Y_{o_i} – produtividade observada no i -ésimo dia (kg ha^{-1}); Y_{e_i} – produtividade estimada no i -ésimo dia (kg ha^{-1}); \bar{Y}_o – média da produtividade observada (kg ha^{-1}); \bar{Y}_e – média da produtividade estimada (kg ha^{-1}); n – número de dias da cultura (adimensional).

Os valores do índice “c” indicam o seguinte desempenho do modelo testado: “ótimo” (“c” > 0,85); “muito bom” ($0,76 \leq “c” \leq 0,85$); “bom” ($0,66 \leq “c” \leq 0,75$); “mediano” ($0,61 \leq “c” \leq 0,65$); “sofrível” ($0,51 \leq “c” \leq 0,60$); “mau” ($0,41 \leq “c” \leq 0,50$); e, “péssimo” (“c” $\leq 0,40$).

2.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.5.1 Biomassa seca real e variáveis de entrada nos modelos

Para a cultura da soja, as safras que tiveram maior período de dias após o plantio para atingir o estágio de maturação fisiológica não foram as que obtiveram maior produtividade final de biomassa seca (Tabela 2.3). O mesmo aconteceu para as variáveis radiação solar incidente e precipitação, mas não ocorreu com os graus dias acumulados (*GDA*).

No estágio fenológico V4, a maior produtividade de biomassa ocorreu na safra de soja “Ponta Grossa 06/07”, sendo que a safra apresentou: mudança de estágio com menor número de dias após o plantio (29 dias); menor radiação solar incidente acumulada ($608,40 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), menor acúmulo de precipitação (96,20 mm); e, o segundo menor acúmulo de graus dia ($292,75 \text{ }^{\circ}\text{C}$). No estágio V8 da soja, houve as mesmas características observadas para o estágio V4. No estágio de pleno florescimento (PF), as mesmas características das variáveis foram observadas, com exceção dos graus dias acumulados (*GDA*), em que a safra “Ponta Grossa 06/07” apresentou menor valor da variável. Nesse mesmo estágio e safra, o valor da biomassa seca foi o segundo menor observado em relação às outras safras. No estágio de maturação fisiológica (MF), ocorreram os maiores valores de todas as variáveis observadas na safra de soja (Ponta Grossa 07/08) e, conseqüentemente, a maior produtividade de biomassa seca. Na safra de soja “Ponta Grossa 06/07” obteve-se a segunda maior produtividade de biomassa seca, e o estágio de maturação fisiológica (MF) ocorreu em período mais curto. O mesmo estágio e safra apresentaram o segundo maior valor de graus dias acumulados ($1294,30 \text{ }^{\circ}\text{C}$) entre as safras.

Os graus dias acumulados (*GDA*) para atingir a maturação fisiológica foram superiores aos encontrados na literatura, com exceção da safra “Castro 07/08”. Wazilewski et al. (2011) em trabalho realizado com soja em Cascavel-PR,

encontraram 1130 °C graus dias acumulados para atingir o estágio de maturação fisiológica. Souza et al. (2010) trabalhando com variedade precoce, no nordeste do Pará, obtiveram ciclo fenológico completo da soja com 1200 °C graus dias acumulados.

No estágio V8 (Tabela 2.3), nas safras de soja “Castro 06/07 e 07/08” os dias após o plantio foram os mesmos, e a radiação solar incidente acumulada no período foi semelhante. Porém, os graus dias acumulados foram maiores na safra “Castro 06/07”, ao contrário da variável precipitação, sendo maior na safra “Castro 07/08”. Considerando a produtividade de biomassa seca no estágio V8, a safra “Castro 06/07” apresentou 311,27 kg ha⁻¹ a mais que a safra “Castro 07/08” (Tabela 2.3). O resultado indicou que maiores temperaturas em determinados estágios fenológicos são mais influentes no acúmulo de biomassa pelas plantas do que a variável radiação solar incidente. Temperaturas mais altas causam maior acúmulo de graus dias, aumentando o crescimento da planta, gerando maior acúmulo da biomassa.

As safras de milho “Castro 07/08a” e “Ponta Grossa 07/08” foram as que tiveram maior tempo para atingir a Maturação Fisiológica, sendo 174 e 175 dias após o plantio, respectivamente. Observou-se que mesmo tendo apenas um dia de diferença, os graus dias acumulados, a radiação solar incidente acumulada e a precipitação acumulada foram relativamente maiores na safra “Ponta Grossa 07/08”. A produtividade final de biomassa seca entre essas safras também foi maior, sendo que ambas superaram as demais (Tabela 2.3). No estágio de Pleno Florescimento, as safras “Castro 07/08b” e “Ponta Grossa 07/08” apresentaram os mesmos dias após o plantio (85 dias). Porém, na safra “Ponta Grossa 07/08” houve aumento de 78,6 °C graus dias acumulados e 169,6 MJ m⁻² dia⁻¹ de radiação solar incidente acumulada, e diminuição de 88,7 mm de precipitação, em relação a safra “Castro 07/08b”. A safra “Castro 07/08b” obteve 1164,74 kg ha⁻¹ de redução na produtividade de biomassa em relação à safra “Ponta Grossa 07/08”, evidenciando a influência das variáveis na produtividade de biomassa seca.

TABELA 2.3. BIOMASSA SECA REAL, DIAS APÓS O PLANTIO, GRAUS DIA APÓS O PLANTIO, RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE ACUMULADA E PRECIPITAÇÃO ACUMULADA NO FINAL DE CADA ESTÁDIO FENOLÓGICO DAS CULTURAS DA SOJA E MILHO, NAS DIFERENTES SAFRAS, NA REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS.

| Variável | Safr | Estádios fenológicos | | | |
|--|-------------------------|----------------------|---------|----------|----------|
| | | V4 | V8 | PF | MF |
| ----- Soja ----- | | | | | |
| Biomassa seca real (kg ha ⁻¹) | C-06/07 ⁽¹⁾ | 382,69 | 1432,33 | 3897,71 | 7959,83 |
| | P-06/07 ⁽²⁾ | 930,13 | 1642,96 | 4805,79 | 8661,25 |
| | C-07/08 ⁽¹⁾ | 347,21 | 1121,06 | 5410,13 | 7366,71 |
| | P-07/08 ⁽²⁾ | 373,31 | 715,44 | 6172,17 | 12771,25 |
| Dias após o plantio (dia) | C-06/07 ⁽¹⁾ | 37 | 51 | 68 | 134 |
| | P-06/07 ⁽²⁾ | 29 | 43 | 56 | 127 |
| | C-07/08 ⁽¹⁾ | 36 | 51 | 82 | 149 |
| | P-07/08 ⁽²⁾ | 41 | 56 | 85 | 161 |
| Graus dia após o plantio (°C) | C-06/07 ⁽¹⁾ | 337,95 | 468,05 | 618,80 | 1225,20 |
| | P-06/07 ⁽²⁾ | 292,75 | 431,50 | 563,00 | 1294,30 |
| | C-07/08 ⁽¹⁾ | 266,35 | 374,75 | 607,75 | 1104,30 |
| | P-07/08 ⁽²⁾ | 330,05 | 473,35 | 735,45 | 1358,85 |
| Radiação solar incidente acumulada (MJ m ⁻² dia ⁻¹) | C-06/07 ⁽¹⁾ | 790,90 | 1056,00 | 1419,50 | 2765,90 |
| | P-06/07 ⁽²⁾ | 608,40 | 881,10 | 1174,30 | 2613,40 |
| | C-07/08 ⁽¹⁾ | 722,30 | 1059,40 | 1610,40 | 2717,00 |
| | P-07/08 ⁽²⁾ | 812,50 | 1141,30 | 1830,90 | 3262,30 |
| Precipitação acumulada (mm) | C-06/07 ⁽¹⁾ | 163,00 | 246,30 | 345,10 | 627,80 |
| | P-06/07 ⁽²⁾ | 96,20 | 131,80 | 201,20 | 490,80 |
| | C-07/08 ⁽¹⁾ | 280,10 | 328,00 | 441,40 | 668,70 |
| | P-07/08 ⁽²⁾ | 160,40 | 263,40 | 428,60 | 735,20 |
| ----- Milho ----- | | | | | |
| Biomassa seca real (kg ha ⁻¹) | C-06/07 ⁽¹⁾ | 534,40 | 1019,79 | 4860,52 | 3072,22 |
| | C-07/08a ⁽¹⁾ | 110,92 | 4332,07 | 9917,79 | 17629,99 |
| | C-07/08b ⁽¹⁾ | 279,02 | 3423,98 | 9034,99 | 14259,64 |
| | P-07/08 ⁽²⁾ | 1176,99 | 3307,44 | 10199,73 | 20677,49 |
| Dias após o plantio (dia) | C-06/07 ⁽¹⁾ | 39 | 68 | 85 | 146 |
| | C-07/08a ⁽¹⁾ | 46 | 77 | 97 | 174 |
| | C-07/08b ⁽¹⁾ | 35 | 64 | 85 | 160 |
| | P-07/08 ⁽²⁾ | 48 | 61 | 85 | 175 |
| Graus dia após o plantio (°C) | C-06/07 ⁽¹⁾ | 374,10 | 671,95 | 878,75 | 1612,40 |
| | C-07/08a ⁽¹⁾ | 481,75 | 801,55 | 1028,85 | 1834,95 |
| | C-07/08b ⁽¹⁾ | 377,55 | 674,80 | 899,70 | 1696,05 |
| | P-07/08 ⁽²⁾ | 549,80 | 698,80 | 978,30 | 2011,25 |
| Radiação solar incidente acumulada (MJ m ⁻² dia ⁻¹) | C-06/07 ⁽¹⁾ | 708,60 | 1343,80 | 1697,70 | 2946,60 |
| | C-07/08a ⁽¹⁾ | 740,70 | 1437,20 | 1848,50 | 3140,50 |
| | C-07/08b ⁽¹⁾ | 535,70 | 1142,10 | 1588,70 | 2949,50 |
| | P-07/08 ⁽²⁾ | 886,60 | 1242,20 | 1758,30 | 3515,20 |
| Precipitação acumulada (mm) | C-06/07 ⁽¹⁾ | 124,40 | 263,40 | 289,40 | 663,00 |
| | C-07/08a ⁽¹⁾ | 172,10 | 388,20 | 473,90 | 749,50 |
| | C-07/08b ⁽¹⁾ | 163,80 | 361,20 | 467,90 | 707,50 |
| | P-07/08 ⁽²⁾ | 184,80 | 185,60 | 379,20 | 760,40 |

⁽¹⁾ Safras obtidas em Castro; ⁽²⁾ Safras obtidas em Ponta Grossa. FONTE: O autor (2019).

2.5.2 Calibração dos modelos testados

2.5.2.1 Calibração dos modelos para a cultura da soja

O resultado da calibração dos modelos testados para os dias após o plantio (*DAP*), graus dias acumulado (*GDA*), radiação solar incidente acumulada (*Rs*) e precipitação acumulada (*P*) para a cultura da soja encontram-se na Tabela 2.4 e Apêndice 1.

Ratkowsky (1983) considera que nos modelos do tipo sigmoidal o parâmetro “*a*” indica o ponto máximo da variável dependente. Mesmo sendo ajustados, os valores dos parâmetros “*a*”, da maioria dos modelos testados, foram similares a produtividade de biomassa seca no estágio final de cada safra da cultura (Tabela 2.3). Os valores de cada parâmetro dos modelos ficaram próximos entre as safras, com exceção do parâmetro “*a*” no modelo Brody (1945). Os resultados obtidos são coerentes, pois a maioria das funções estudadas são modelos do tipo exponencial, em que o parâmetro “*a*” representa o valor máximo obtido pela variável (massa, tamanho, volume, entre outros) no ciclo considerado.

Para algumas variáveis, os valores do parâmetro “*b*” ficaram próximos em todas as safras. No modelo Streibig (1988), os valores do parâmetro “*b*” variaram entre -6,32 e -4,79 para variáveis dias após o plantio (*DAP*), graus dias acumulados (*GDA*) e radiação solar incidente acumulada (*Rs*). Para a variável precipitação acumulada (*P*), houve maior variação de “*b*” (-9,06 a -3,50). O mesmo ocorreu nos modelos Gompertz e Philos (1825), Brody (1945), Bertalanffy (1957) e Garcia e Garcia (2002), em que a variável precipitação acumulada (*P*) apresentou maior variação devido à safra “Castro 07/08”, que apresentou maiores valores de precipitação acumulada nos primeiros estágios de coleta. Os valores do parâmetro “*b*” estão ligados à forma das curvas dos modelos. Um contraste dos valores das variáveis (Tabela 2.3) e parâmetro “*b*” (Tabela 2.4) indicam que quanto maior o valor das variáveis maior foi o valor de “*b*” e, conseqüentemente, mais distante a curva dos modelos ficou do eixo “*y*”.

TABELA 2.4. CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SEIS MODELOS PARA ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE DE BIOMASSA SECA NO ESTÁDIO FINAL DE QUATRO SAFRAS DA CULTURA DA SOJA, NA REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, TENDO COMO VARIÁVEIS DE ENTRADA: DIAS APÓS O PLANTIO (DAP); GRAUS DIAS ACUMULADO (GDA); RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE ACUMULADA (Rs); E, PRECIPITAÇÃO ACUMULADA (P).

| Safrá | Modelo logístico não linear (Streibig, 1988) | | | | Modelo não linear (Gompertz e Philos 1925) | | | | Modelo não linear (Ratkowsky, 1983) | | | | Modelo não linear (Brody, 1945) | | | | Modelo não linear (Bertalanffy, 1957) | | | | Modelo sigmoidal (Garcia e Garcia (2002)) | | | | |
|---|--|------------|------------------|-------------------------|--|------------|------------------|-------------------------|-------------------------------------|------------|------------------|-------------------------|---------------------------------|------------|------------------|-------------------------|---------------------------------------|------------|------------------|-------------------------|---|------------|------------------|-------------------------|---|
| | a (kg ha ⁻¹) | b (ad.) | c ⁽⁴⁾ | R ² (ad.) | a (kg ha ⁻¹) | b (ad.) | c ⁽⁴⁾ | R ² (ad.) | a (kg ha ⁻¹) | b (ad.) | c ⁽⁴⁾ | R ² (ad.) | a (kg ha ⁻¹) | b (ad.) | c ⁽⁴⁾ | R ² (ad.) | a (kg ha ⁻¹) | b (ad.) | c ⁽⁴⁾ | R ² (ad.) | a (kg ha ⁻¹) | b (ad.) | c ⁽⁴⁾ | R ² (ad.) | |
| Dias após o plantio (DAP) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| C-06/07 ⁽¹⁾ | 8271,8 | -4,96 | 69,65 | 1,00 | 8220,3 | 19,71 | 0,05 | 1,00 | 7980,7 | 455,54 | 0,09 | 1,00 | 12203,7 | 1,47 | 0,01 | 0,99 | 8521,4 | 2,67 | 0,04 | 1,00 | 9972,03 | 2,31 | 111,92 | 1,00 | — |
| P-06/07 ⁽²⁾ | 8789,7 | -5,23 | 54,65 | 0,99 | 8778,4 | 19,27 | 0,06 | 0,99 | 8681,7 | 390,43 | 0,11 | 0,99 | 11063,2 | 1,47 | 0,02 | 0,96 | 8712,9 | 6,94 | 0,07 | 0,99 | 13738,72 | 2,14 | 98,44 | 0,99 | — |
| C-07/08 ⁽¹⁾ | 7477,2 | -5,55 | 69,07 | 1,00 | 7438,6 | 31,41 | 0,06 | 1,00 | 7374,5 | 492,92 | 0,09 | 1,00 | 8723,7 | 1,90 | 0,02 | 0,96 | 7449,3 | 5,81 | 0,05 | 1,00 | 9814,00 | 2,19 | 121,37 | 1,00 | — |
| P-07/08 ⁽²⁾ | 13022,8 | -6,32 | 86,44 | 1,00 | 13078,3 | 36,24 | 0,05 | 1,00 | 12785,4 | 2578,79 | 0,09 | 1,00 | 27090,0 | 1,26 | 0,01 | 0,98 | 13428,4 | 4,29 | 0,03 | 1,00 | 18437,45 | 3,24 | 132,80 | 1,00 | — |
| Média ⁽³⁾ | 10028,10 | -5,50 | 70,25 | — | 10025,67 | 25,07 | 0,05 | — | 9815,93 | 1141,59 | 0,10 | — | 16785,6 | 1,40 | 0,01 | — | 10220,90 | 4,63 | 0,05 | — | 14049,40 | 2,56 | 114,39 | — | — |
| Graus dias acumulado (GDA) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| C-06/07 ⁽¹⁾ | 8238,5 | -5,08 | 632,70 | 1,00 | 8197,3 | 21,00 | 0,01 | 1,00 | 7977,6 | 509,72 | 0,01 | 1,00 | 12151,7 | 1,47 | 0,00 | 0,99 | 8479,7 | 2,81 | 0,00 | 1,00 | 10186,53 | 2,37 | 1017,84 | 1,00 | — |
| P-06/07 ⁽²⁾ | 8785,4 | -5,19 | 549,19 | 0,99 | 8770,9 | 19,00 | 0,01 | 0,99 | 8680,8 | 382,11 | 0,01 | 0,99 | 10837,9 | 1,50 | 0,00 | 0,96 | 8705,6 | 6,95 | 0,01 | 0,99 | 13967,59 | 2,12 | 998,28 | 0,99 | — |
| C-07/08 ⁽¹⁾ | 7483,2 | -5,45 | 510,55 | 1,00 | 7441,8 | 29,37 | 0,01 | 1,00 | 7374,3 | 454,89 | 0,01 | 1,00 | 8680,2 | 1,91 | 0,00 | 0,96 | 7457,4 | 5,41 | 0,01 | 1,00 | 9735,20 | 2,16 | 900,37 | 1,00 | — |
| P-07/08 ⁽²⁾ | 13138,9 | -5,99 | 750,75 | 1,00 | 13206,2 | 30,62 | 0,01 | 1,00 | 12797,4 | 1833,70 | 0,01 | 1,00 | 39817,2 | 1,14 | 0,00 | 0,98 | 13685,0 | 3,64 | 0,00 | 1,00 | 16918,51 | 3,07 | 1140,66 | 1,00 | — |
| Média ⁽³⁾ | 10054,27 | -5,42 | 644,21 | — | 10058,13 | 23,54 | 0,01 | — | 9818,6 | 908,51 | 0,01 | — | 20935,60 | 1,37 | 0,00 | — | 10290,1 | 4,47 | 0,00 | — | 13690,88 | 2,52 | 1052,26 | — | — |
| Radiação solar incidente acumulada (Rs) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| C-06/07 ⁽¹⁾ | 8297,4 | -4,92 | 1454,57 | 1,00 | 8239,3 | 19,47 | 0,00 | 1,00 | 7983,5 | 443,74 | 0,00 | 1,00 | 11818,6 | 1,53 | 0,00 | 0,99 | 8547,5 | 2,67 | 0,00 | 1,00 | 9803,75 | 2,30 | 2324,12 | 1,00 | — |
| P-06/07 ⁽²⁾ | 8850,1 | -4,79 | 1146,26 | 0,99 | 8807,7 | 16,04 | 0,00 | 0,99 | 8681,1 | 285,58 | 0,00 | 1,00 | 11023,1 | 1,50 | 0,00 | 0,97 | 9023,8 | 2,16 | 0,00 | 0,98 | 12629,36 | 2,00 | 2054,02 | 0,99 | — |
| C-07/08 ⁽¹⁾ | 7482,1 | -6,28 | 1384,68 | 1,00 | 7448,7 | 53,32 | 0,00 | 1,00 | 7383,3 | 936,10 | 0,00 | 1,00 | 9830,8 | 1,71 | 0,00 | 0,95 | 7515,0 | 7,61 | 0,00 | 1,00 | 9474,96 | 2,60 | 2270,68 | 1,00 | — |
| P-07/08 ⁽²⁾ | 13386,6 | -5,53 | 1884,06 | 1,00 | 13487,8 | 23,80 | 0,00 | 1,00 | 12827,5 | 1257,25 | 0,00 | 1,00 | 54338,6 | 1,10 | 0,00 | 0,98 | 14114,9 | 3,09 | 0,00 | 1,00 | 15255,95 | 2,84 | 2816,30 | 1,00 | — |
| Média ⁽³⁾ | 10178,03 | -5,08 | 1494,96 | — | 10178,27 | 19,77 | 0,00 | — | 9830,7 | 662,19 | 0,00 | — | 25726,77 | 1,38 | 0,00 | — | 10562,1 | 2,64 | 0,00 | — | 12563,02 | 2,38 | 2398,15 | — | — |
| Precipitação acumulada (P) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| C-06/07 ⁽¹⁾ | 8864,3 | -4,05 | 366,90 | 1,00 | 8695,2 | 12,18 | 0,01 | 1,00 | 8071,7 | 206,01 | 0,02 | 1,00 | 21864,7 | 1,16 | 0,00 | 0,99 | 9401,5 | 1,77 | 0,01 | 1,00 | 8412,31 | 1,91 | 566,59 | 1,00 | — |
| P-06/07 ⁽²⁾ | 9013,9 | -3,50 | 195,03 | 1,00 | 8787,0 | 9,05 | 0,01 | 1,00 | 8672,5 | 86,43 | 0,02 | 1,00 | 9922,6 | 1,53 | 0,01 | 0,99 | 7755,4 | 9,96 | 0,02 | 0,93 | 11405,18 | 1,40 | 384,11 | 1,00 | — |
| C-07/08 ⁽¹⁾ | 7432,8 | -9,06 | 396,10 | 1,00 | 7456,1 | 268,40 | 0,02 | 1,00 | 7375,6 | 16477,08 | 0,02 | 1,00 | 8660,7 | 4,31 | 0,01 | 0,97 | 7501,7 | 33,05 | 0,01 | 1,00 | 10476,28 | 26,62 | 401,25 | 1,00 | — |
| P-07/08 ⁽²⁾ | 13606,1 | -5,41 | 443,75 | 1,00 | 13748,5 | 22,61 | 0,01 | 1,00 | 12875,2 | 1035,56 | 0,02 | 1,00 | 376370,9 | 1,01 | 0,00 | 0,98 | 14795,8 | 2,62 | 0,01 | 1,00 | 14389,26 | 2,81 | 650,22 | 1,00 | — |
| Média ⁽³⁾ | 10494,77 | -4,32 | 335,23 | — | 10410,23 | 14,61 | 0,01 | — | 9873,1 | 442,67 | 0,02 | — | 136052,7 | 1,23 | 0,00 | — | 10850,9 | 4,78 | 0,01 | — | 11402,25 | 2,04 | 533,64 | — | — |

⁽¹⁾ Safras obtidas em Castro; ⁽²⁾ Safras obtidas em Ponta Grossa; ⁽³⁾ Médias obtidas nas safras de calibração: “Castro 2006/2007”, “Ponta Grossa 2006/2007” e “Ponta Grossa 2007/2008”; ⁽⁴⁾ Mesma unidade da variável independente. FONTE: O autor (2019).

O valor do parâmetro “c” dos modelos Streibig (1988) e Garcia e Garcia (2002) alterou entre as variáveis, porém ficaram próximos entre as safras. O parâmetro “c” é influenciado pela escala de cada variável. Os modelos Gompertz e Philos (1825), Ratkowsky (1983), Brody (1945) e Bertalanffy (1957) resultaram parâmetros “c” muito pequenos, geralmente abaixo de 0,1. O coeficiente de determinação (R^2) apresentou ótimos resultados, em todos os modelos calibrados, com variação significativa. O menor valor foi de 0,93, observado na Safra “Ponta Grossa 06/07”, com a variável precipitação acumulada, no modelo Bertalanffy (1957) (TABELA 2.4). Silva et al. (2014), utilizando o modelo Streibig (1988), encontraram excelentes ajustes ($R^2 \geq 0,98$) entre biomassa seca de plantas daninhas e a variável graus dias acumulados (GDA). O entendimento da produção de biomassa seca é fundamental para inferir sobre os processos fisiológicos do crescimento das plantas.

A cultivar de soja testada possui característica do ciclo total médio de 129 dias. A menor duração do ciclo total ocorreu na safra “Ponta Grossa 06/07” (127 dias). No entanto, essa foi a segunda entre as quatro safras estudadas que apresentou maiores valores de biomassa seca no final do ciclo. O resultado evidenciou que as plantas responderam a outros fatores que não se relacionam necessariamente com o tempo em que a cultura permanece no campo. Conforme observado nas quatro safras analisadas, o ciclo da cultura da soja diminuiu à medida que a semeadura é realizada em datas mais tardias, o mesmo relatado por Dallacort et al. (2006).

Vários trabalhos consideram que modelos do tipo logístico são os que melhor se ajustam ao crescimento e acúmulo de matéria seca das plantas (Maia et al., 2009; Pôrto et al., 2007). Dentre os modelos ajustados, muitos são utilizados para avaliar o crescimento e desenvolvimento de plantas, utilizando o tempo como variável. No entanto, pouco se tem na literatura sobre o uso dos modelos com as variáveis graus dias acumulados (GDA), radiação solar incidente acumulada (R_s) e precipitação acumulada (P). No presente estudo, verificou-se a possibilidade da associação do acúmulo da biomassa seca da soja com as variáveis pouco utilizadas.

O ajuste dos modelos com a variável graus dias acumulados (GDA) ficou adequado devido a necessidade térmica ser atingida em todas as safras. Para a soja, Grein et al. (2015) descreveram que o ciclo fenológico se completa com

1075 °C *GDA*, para temperatura basal de 14 °C. A safra “Castro 07/08” foi a que apresentou menor acúmulo de graus dias acumulados (*GDA*; 1104,30 °C), mostrando que o acúmulo total da temperatura no ciclo não foi fator limitante. Porém, a temperatura influenciou ao longo do ciclo da cultura, entre os estádios fenológicos.

Os dados de radiação solar incidente (*Rs*) algumas vezes são de difícil obtenção. No entanto, a variável é imprescindível na maioria dos modelos que simulam o crescimento das culturas, visto que a fotossíntese é estimulada principalmente pela radiação solar (Trnka, 2007).

Como a variável precipitação não é bem definida ao longo do ciclo das culturas e o experimento não foi irrigado, a falta ou excesso de chuva em determinada época pode ser a causa que mais influenciou no ajuste dos modelos. Durante o ciclo de todas as safras avaliadas não houve deficiência hídrica por longos períodos de tempo. O intervalo máximo sem ocorrência de precipitação foi de 10 dias, na safra “Castro 06/07”. São necessários durante o ciclo da soja entre 550 a 800 mm de água para obtenção de bons rendimentos (EMBRAPA, 2013). Na Tabela 2.3, verificou-se que a safra “Ponta Grossa 06/07” (490,80 mm) foi a única com precipitação acumulada menor que estes valores durante o ciclo da cultura. A maior precipitação acumulada ocorreu na safra “Ponta Grossa 07/08” (735,2 mm). Silva et al. (2018) calibrando e validando modelos de estimativa do crescimento da cultura da soja tiveram sua produtividade limitada devido ao estresse hídrico. Gomes et al. (2014), em condições irrigadas, propuseram um modelo capaz de prever satisfatoriamente o rendimento da soja, evidenciando que cultivos sem déficit hídrico resultaram em menor variabilidade das produtividades.

2.5.2.2 Calibração dos modelos para a cultura do milho

O resultado da calibração dos modelos testados para os dias após o plantio (*DAP*), graus dias acumulado (*GDA*), radiação solar incidente acumulada (*Rs*) e precipitação acumulada (*P*) para a cultura do milho encontram-se na Tabela 2.5 e Apêndice 2.

TABELA 2.5. CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SEIS MODELOS PARA ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE DE BIOMASSA SECA NO ESTÁDIO FINAL DE QUATRO SAFRAS DA CULTURA DO MILHO, NA REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, TENDO COMO VARIÁVEIS DE ENTRADA: DIAS APÓS O PLANTIO (DAP); GRAUS DIAS ACUMULADO (GDA); RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE ACUMULADA (Rs); E, PRECIPITAÇÃO ACUMULADA (P).

| Safral | ----- Modelo logístico não linear ----- (Streibig, 1988) | | | | | ----- Modelo não linear ----- (Gompertz e Philos 1825) | | | | | ----- Modelo não linear ----- (Ratkowsky, 1983) | | | | | ----- Modelo não linear ----- (Brody, 1945) | | | | | ----- Modelo não linear ----- (Bertalanffy, 1957) | | | | | ----- Modelo sigmoidal ----- García e García (2002) | | | | | | | |
|---|---|---------|------------------|----------------|------------------------|---|------------------|----------------|------------------------|-----------------------|--|----------------|------------------------|-------|------------------|--|------------------------|-------|------------------|----------------|--|-------|------------------|----------------|------------------------|--|------------------|----------------|------------------------|-------|------------------|-------|--|
| | a | b | c ⁽⁶⁾ | R ² | a | b | c ⁽⁶⁾ | R ² | a | b | c ⁽⁶⁾ | R ² | a | b | c ⁽⁶⁾ | R ² | a | b | c ⁽⁶⁾ | R ² | a | b | c ⁽⁶⁾ | R ² | a | b | c ⁽⁶⁾ | R ² | a | b | c ⁽⁶⁾ | | |
| | (kg ha ⁻¹) | (ad.) | | (ad.) | (kg ha ⁻¹) | (ad.) | | (ad.) | (kg ha ⁻¹) | (ad.) | | (ad.) | (kg ha ⁻¹) | (ad.) | | (ad.) | (kg ha ⁻¹) | (ad.) | | (ad.) | (kg ha ⁻¹) | (ad.) | | (ad.) | (kg ha ⁻¹) | (ad.) | | (ad.) | (kg ha ⁻¹) | (ad.) | | (ad.) | |
| ----- Dias após o plantio (DAP) ----- | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| C-06/07 ⁽¹⁾ | 3986,36 | -73,72 | 68,99 | 0,86 | 3938,47 | 100,00 ⁽³⁾ | 0,07 | 0,62 | 3977,15 | 100,00 ⁽³⁾ | 0,40 | 0,38 | 3690,97 | 3,56 | 0,04 | 0,51 | 3852,40 | 16,82 | 0,07 | 0,60 | 11836,76 | 5,91 | 112,44 | 0,99 | | | | | | | | | |
| C-07/08a ⁽¹⁾ | 18079,97 | -5,92 | 93,78 | 1,00 | 18005,26 | 40,41 | 0,04 | 1,00 | 17663,01 | 869,49 | 0,07 | 1,00 | 30911,03 | 1,37 | 0,01 | 0,98 | 18295,34 | 5,83 | 0,04 | 1,00 | 22148,76 | 2,67 | 146,87 | 1,00 | | | | | | | | | |
| C-07/08b ⁽¹⁾ | 14473,34 | -5,87 | 78,01 | 1,00 | 14384,63 | 43,65 | 0,05 | 1,00 | 14271,70 | 611,16 | 0,08 | 1,00 | 20932,09 | 1,40 | 0,01 | 0,97 | 14647,59 | 4,96 | 0,04 | 1,00 | 19255,60 | 2,38 | 130,72 | 1,00 | | | | | | | | | |
| P-07/08 ⁽²⁾ | 21368,41 | -4,83 | 86,62 | 1,00 | 21182,57 | 18,62 | 0,04 | 1,00 | 20710,11 | 412,12 | 0,07 | 1,00 | 26974,15 | 1,68 | 0,01 | 0,99 | 21771,22 | 2,63 | 0,03 | 1,00 | 27152,12 | 2,22 | 143,36 | 1,00 | | | | | | | | | |
| Média ⁽⁴⁾ | 14471,58 | -28,16 | 83,13 | — | 14375,43 | 53,01 | 0,05 | — | 14116,76 | 460,54 | 0,18 | — | 20525,38 | 2,20 | 0,02 | — | 14639,65 | 8,43 | 0,05 | — | 20379,21 | 3,60 | 134,22 | — | | | | | | | | | |
| ----- Graus dias acumulado (GDA) ----- | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| C-06/07 ⁽¹⁾ | 3967,26 | -44,90 | 687,89 | 0,86 | 3977,73 | 100,00 ⁽³⁾ | 0,01 | 0,67 | 3831,52 | 100,00 ⁽³⁾ | 0,01 | 0,63 | 3699,43 | 3,15 | 0,00 | 0,53 | 3881,95 | 13,04 | 0,01 | 0,63 | 11363,65 | 4,50 | 1207,77 | 0,99 | | | | | | | | | |
| C-07/08a ⁽¹⁾ | 18232,79 | -5,49 | 994,92 | 1,00 | 18127,77 | 30,36 | 0,00 | 1,00 | 17679,97 | 604,04 | 0,01 | 1,00 | 30891,10 | 1,37 | 0,00 | 0,99 | 18430,91 | 4,80 | 0,00 | 1,00 | 21200,72 | 2,48 | 1564,75 | 1,00 | | | | | | | | | |
| C-07/08b ⁽¹⁾ | 14482,45 | -5,79 | 824,95 | 1,00 | 14391,23 | 41,03 | 0,00 | 1,00 | 14270,00 | 581,20 | 0,01 | 1,00 | 20395,83 | 1,43 | 0,00 | 0,97 | 14611,17 | 5,15 | 0,00 | 1,00 | 19173,67 | 2,35 | 1385,94 | 1,00 | | | | | | | | | |
| P-07/08 ⁽²⁾ | 21406,55 | -4,77 | 997,80 | 1,00 | 21205,12 | 18,04 | 0,00 | 1,00 | 20713,12 | 389,07 | 0,01 | 1,00 | 27099,02 | 1,67 | 0,00 | 0,99 | 21840,82 | 2,48 | 0,00 | 1,00 | 26869,21 | 2,19 | 1651,40 | 1,00 | | | | | | | | | |
| Média ⁽⁴⁾ | 14535,53 | -18,39 | 893,54 | — | 14436,87 | 49,47 | 0,00 | — | 14074,87 | 364,37 | 0,01 | — | 20563,18 | 2,06 | 0,00 | — | 14717,89 | 6,77 | 0,00 | — | 19811,19 | 3,06 | 1474,64 | — | | | | | | | | | |
| ----- Radiação solar incidente acumulada (Rs) ----- | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| C-06/07 ⁽¹⁾ | 3966,27 | -53,78 | 1370,46 | 0,86 | 3952,82 | 100,00 ⁽³⁾ | 0,00 | 0,63 | 3799,52 | 100,00 ⁽³⁾ | 0,00 | 0,60 | 3697,02 | 2,82 | 0,00 | 0,50 | 3845,11 | 11,01 | 0,00 | 0,59 | 11589,35 | 5,57 | 2258,40 | 0,99 | | | | | | | | | |
| C-07/08a ⁽¹⁾ | 18557,33 | -5,29 | 1800,46 | 1,00 | 18409,97 | 27,92 | 0,00 | 1,00 | 17772,04 | 472,59 | 0,00 | 1,00 | 63992,34 | 1,11 | 0,00 | 0,98 | 19055,02 | 3,82 | 0,00 | 1,00 | 19697,83 | 2,41 | 2764,34 | 1,00 | | | | | | | | | |
| C-07/08b ⁽¹⁾ | 14669,50 | -5,00 | 1446,49 | 1,00 | 14495,79 | 24,53 | 0,00 | 1,00 | 14296,56 | 264,67 | 0,00 | 1,00 | 24644,38 | 1,22 | 0,00 | 0,97 | 14838,49 | 3,29 | 0,00 | 1,00 | 17342,76 | 1,99 | 2461,96 | 1,00 | | | | | | | | | |
| P-07/08 ⁽²⁾ | 21820,50 | -4,39 | 1814,89 | 1,00 | 21529,36 | 14,46 | 0,00 | 1,00 | 20759,23 | 270,74 | 0,00 | 1,00 | 33703,48 | 1,35 | 0,00 | 0,99 | 22463,73 | 2,09 | 0,00 | 1,00 | 24633,90 | 2,01 | 2962,97 | 1,00 | | | | | | | | | |
| Média ⁽⁴⁾ | 14781,37 | -21,15 | 1661,94 | — | 14630,72 | 47,46 | 0,00 | — | 14110,26 | 281,11 | 0,00 | — | 33797,61 | 1,76 | 0,00 | — | 15121,29 | 5,64 | 0,00 | — | 18640,36 | 3,33 | 2661,90 | — | | | | | | | | | |
| ----- Precipitação acumulada (P) ----- | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| C-06/07 ⁽¹⁾ | 3968,08 | -135,91 | 265,47 | 0,86 | 3461,99 | 19,16 | 0,02 | 0,44 | 3530,07 | 100,00 ⁽³⁾ | 0,02 | 0,46 | 3365,53 | 3,41 | 0,01 | 0,42 | 3415,27 | 2,87 | 0,01 | 0,43 | 10000,00 ⁽³⁾ | 2,66 | 469,44 | 0,86 | | | | | | | | | |
| C-07/08a ⁽¹⁾ | 18323,77 | -6,70 | 462,38 | 1,00 | 18342,75 | 68,69 | 0,01 | 1,00 | 17799,52 | 1543,74 | 0,02 | 1,00 | 657640,53 | 1,01 | 0,00 | 0,97 | 20829,88 | 3,16 | 0,01 | 0,99 | 20007,42 | 3,29 | 666,52 | 1,00 | | | | | | | | | |
| C-07/08b ⁽¹⁾ | 14954,37 | -6,30 | 437,66 | 1,00 | 14910,85 | 56,38 | 0,01 | 1,00 | 14464,14 | 915,24 | 0,02 | 1,00 | 278671,07 | 1,02 | 0,00 | 0,96 | 16738,22 | 3,20 | 0,01 | 0,99 | 15501,89 | 2,96 | 639,29 | 1,00 | | | | | | | | | |
| P-07/08 ⁽²⁾ | 25365,87 | -2,70 | 439,09 | 0,99 | 20679,32 | 673,06 | 0,02 | 0,99 | 21072,50 | 100,00 ⁽³⁾ | 0,01 | 0,99 | 46807,64 | 1,22 | 0,00 | 0,99 | 21324,74 | 5,89 | 0,01 | 0,99 | 50000,00 ⁽³⁾ | 4,61 | 596,77 | 0,99 | | | | | | | | | |
| Média ⁽⁴⁾ | 15885,91 | -48,44 | 388,98 | — | 14161,35 | 253,64 | 0,02 | — | 14134,03 | 581,25 | 0,02 | — | 235937,90 | 1,88 | 0,00 | — | 15189,96 | 3,97 | 0,01 | — | 26669,14 | 3,52 | 577,58 | — | | | | | | | | | |

⁽¹⁾ Safras obtidas em Castro; ⁽²⁾ Safras obtidas em Ponta Grossa; ⁽³⁾ Valores condicionados a restrição de limite máximo na calibração; ⁽⁴⁾ Médias obtidas nas safras de calibração: “Castro 2006/2007”, “Castro 2007/2008 1” e “Ponta Grossa 2007/2008”; ⁽⁵⁾ Mesma unidade da variável independente. FONTE: O autor (2019).

Os parâmetros ajustados para todos os modelos na safra “Castro 06/07” foram diferentes dos demais. A biomassa seca entre o estágio “Pleno Florescimento” e “Maturação Fisiológica” decaiu, ao invés de aumentar (Tabela 2.3). O problema não identificado pode ter ocorrido devido a alguma variação ou erro experimental entre a coleta e obtenção da matéria seca. Logo, a obtenção de bons ajustes para safra “Castro 06/07” realmente não seriam possíveis, pois os modelos testados consideram que a biomassa seca das plantas só tende a aumentar, e não diminuir.

Bem como ocorreu no ajuste dos parâmetros dos modelos para soja, os valores do parâmetro “*a*” da maioria dos modelos ficaram próximos da biomassa seca final da cultura do milho. Nos modelos do tipo sigmoidal, o parâmetro “*a*” indica, aproximadamente, o ponto máximo atingido pela variável dependente. Nos modelos Brody (1945) e Garcia e Garcia (2002) houve grande variação entre o menor e maior valor. No modelo Brody (1945) o menor e maior valor foram 3365,5 e 657640,5 kg ha⁻¹, respectivamente, e no modelo Garcia e Garcia (2002), o menor e maior valor foram 10000,0 e 50000,0 kg ha⁻¹, respectivamente. Nos dois modelos, os valores ocorreram na variável precipitação acumulada. O resultado indicou que altas variações dos parâmetros tornam os modelos menos eficiente, uma vez que a estimativa da produtividade tende a se tornar imprecisa. A precipitação não é bem distribuída ao longo do ciclo das culturas, podendo ocorrer longos dias de seca, ocasionando redução na produtividade. Além disso, houve a necessidade de condicionar alguns parâmetros, de alguns modelos e variáveis, restringindo os limites máximos, pois no processo de calibração sem restrição os valores de “*a*” se tornavam muito altos e inconsistentes. Os limites máximos impostos como restrição foram valores um pouco superiores a biomassa seca acumulada no estágio final de cada safra do milho.

O parâmetro “*b*” do modelo Streibig (1988) ficou com os valores próximos, exceto na safra “Castro 06/07”. No modelo Gompertz e Philos (1825) ocorreu o mesmo, porém o parâmetro variou no ajuste da variável precipitação acumulada, sendo o menor valor 19,16 e o maior 673,06 (TABELA 2.5). No modelo Ratkowsky (1983) os valores de “*b*” foram superiores aos demais, apresentando maior amplitude, sendo o menor e maior valor igual a 100,0 e 1543,7, respectivamente. Observou-se também que houve restrição do parâmetro na safra “Castro 06/07”,

para todas as variáveis testadas. Nos modelos Brody (1945), Bertalanffy (1957) e Garcia e Garcia (2002) não houve variação entre o menor e maior valor de “*b*”, mas os maiores valores ainda se destacaram na safra “Castro 06/07”.

Nos modelos Streibig (1988) e Garcia e Garcia (2002), os valores do parâmetro “*c*” alteraram entre as variáveis, porém ficaram próximos entre as safras (TABELA 2.5). Os valores do parâmetro “*c*” são influenciados pela escala de cada variável, sendo que nos modelos Gompertz e Philos (1825), Ratkowsky (1983), Brody (1945) e Bertalanffy (1957) são muito pequenos, todos abaixo de 0,1.

Campos et al. (2012) encontraram bom ajuste entre a variável dias após o plantio (*DAP*) e acúmulo de biomassa seca total de três espécies de plantas daninhas ($R^2 \geq 0,96$). Com exceção da safra “Castro 06/07”, os coeficientes de determinação (R^2) obtidos nas associações foram estreitos (TABELA 2.5). O menor valor encontrado foi com o modelo Ratkowsky (1983), para a variável dias após plantio (*DAP*; $R^2 = 0,38$). O decaimento da biomassa seca no estágio final da cultura dificultou a obtenção de bons ajustes.

As cultivares de ciclo precoce, como a utilizada no presente experimento, apresentam ciclo médio entre 120 e 130 dias. O menor ciclo ocorreu na safra Castro 06/07 (146 dias; TABELA 2.3), estando de acordo com as características técnicas da cultivar. Para cada estágio fenológico do milho, unidades calóricas são necessárias para o seu desenvolvimento. Com isso, elevadas temperaturas podem acelerar o ciclo da planta devido ao acúmulo de graus dias (Maldaner et al., 2014). O resultado do ajuste dos modelos testados para os graus dias acumulados (*GDA*), para a cultura do milho (TABELA 2.5) não foram bons para a safra “Castro 06/07”. Para as cultivares de ciclo precoce, são necessárias entre 831 e 890 graus dias acumulados para atingir a polinização (Fancelli e Dourado-Neto, 2000). Na Tabela 2.3 observou-se no estágio de Pleno Florescimento que o menor valor de graus dias acumulados foi 878,75 °C, não sendo um fator que limitou a polinização.

A produção de biomassa seca da cultura do milho está diretamente relacionada com a radiação solar, convertendo-a em energia química, na fotossíntese. Tal processo tem sua importância nos processos fisiológicos da planta. Em anos com menor incidência solar e temperaturas mais baixas, há redução na produtividade (Maldaner et al., 2014).

Para que a cultura do milho complete seu ciclo, são necessários entre 500 a 800 mm de chuva (EMBRAPA, 2004). Os valores de precipitação acumulados no final do ciclo da cultura ficaram dentro desse intervalo (TABELA 2.3). Durante o ciclo de todas as safras avaliadas, não houve deficiência hídrica por longos períodos de tempo. O intervalo máximo sem ocorrência de precipitação foi de 9 dias na safra “Castro 06/07”.

2.5.3 Validação dos modelos testados

Com os intervalos de valores dos parâmetros obtidos na calibração para cada modelo e variável, procedeu-se a análise de validação. Para tal, foi utilizada a safra que não foi utilizada no processo de calibração. Mesmo com bons ajustes na calibração, foi possível observar que algumas safras apresentaram erros absolutos e relativos altos. Nas TABELAS 2.6 (soja) e 2.7 (milho) encontram-se erros, coeficientes, índices e desempenho obtidos com os modelos testados nas associações entre a biomassa seca observada e estimada nos quatro estádios fenológicos, para a cultura da soja e milho, respectivamente, nas safras “Castro 2007/2008” e “Castro 2007/2008b”.

2.5.3.1 Validação dos modelos para a cultura da soja

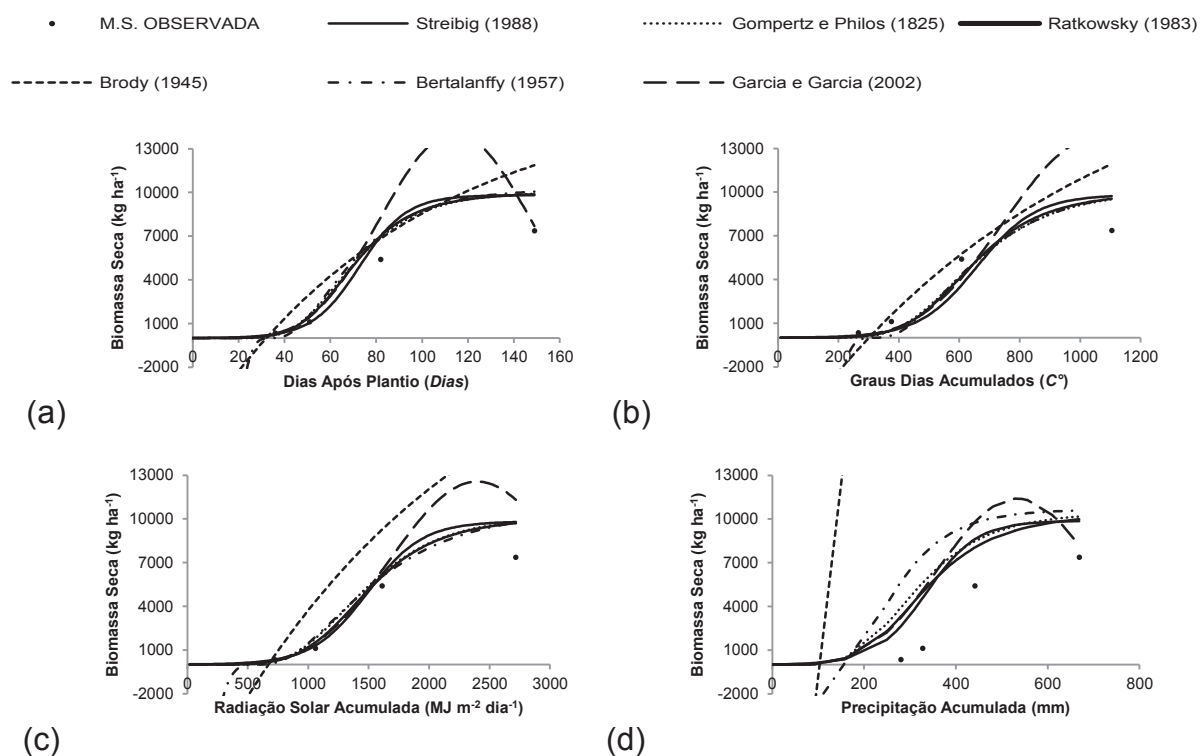
Com exceção do desempenho dos modelos para a variável precipitação (TABELA 2.6), que ficaram entre “péssimo” e “muito bom”, as demais variáveis apresentaram desempenho promissores entre “bom” e “ótimo”, predominantemente “ótimo”. No ajuste individual, observou-se nos modelos Brody (1945) e Bertalanffy (1957) que os valores de biomassa seca no início do ciclo da cultura ficaram negativos para todas as variáveis testadas (FIGURA 2.1). Logo, a utilização dos modelos Brody (1945) e Bertalanffy (1957) foram restritos para determinado intervalo.

TABELA 2.6. ERROS ABSOLUTO (Ea) E RELATIVO (Er), COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO (R), ÍNDICES “ d ” DE WILLMOTT et al. (1982), “ c ” DE CAMARGO E SENTELHAS (1997) E DESEMPENHO, ENTRE A BIOMASSA SECA OBSERVADA E ESTIMADA NOS QUATRO ESTÁDIOS FENOLÓGICOS, PARA A CULTURA DA SOJA, NA SAFRA CASTRO 2007/2008 E MODELOS ANALISADOS.

| Modelo | Ea (kg ha ⁻¹) | Er (%) | R ----- (adimensional) ----- | “ d ” | “ c ” | Desempenho |
|--------------------------|--------------------------------|-------------|-----------------------------------|---------|---------|------------|
| ----- DAP ----- | | | | | | |
| Streibig (1988) | 1142,6 | 24,6 | 1,00 | 0,95 | 0,95 | Ótimo |
| Gompertz e Philos (1825) | 1170,8 | 25,2 | 1,00 | 0,95 | 0,95 | Ótimo |
| Ratkowsky (1983) | 1035,1 | 22,8 | 1,00 | 0,96 | 0,96 | Ótimo |
| Brody (1945) | 2039,3 | 36,4 | 0,97 | 0,88 | 0,86 | Ótimo |
| Bertalanffy (1957) | 1292,0 | 27,6 | 1,00 | 0,95 | 0,95 | Ótimo |
| Garcia e Garcia (2002) | 907,3 | 20,4 | 0,96 | 0,95 | 0,91 | Ótimo |
| ----- GDA ----- | | | | | | |
| Streibig (1988) | 1055,5 | 29,4 | 0,96 | 0,96 | 0,93 | Ótimo |
| Gompertz e Philos (1825) | 1049,2 | 29,3 | 0,96 | 0,96 | 0,93 | Ótimo |
| Ratkowsky (1983) | 1236,2 | 35,3 | 0,94 | 0,95 | 0,89 | Ótimo |
| Brody (1945) | 1619,0 | 35,0 | 0,97 | 0,91 | 0,88 | Ótimo |
| Bertalanffy (1957) | 1193,3 | 34,4 | 0,97 | 0,96 | 0,93 | Ótimo |
| Garcia e Garcia (2002) | 2049,7 | 44,9 | 0,91 | 0,85 | 0,78 | Muito Bom |
| ----- Rs ----- | | | | | | |
| Streibig (1988) | 865,1 | 19,8 | 0,99 | 0,97 | 0,96 | Ótimo |
| Gompertz e Philos (1825) | 1007,5 | 22,3 | 0,99 | 0,96 | 0,95 | Ótimo |
| Ratkowsky (1983) | 849,5 | 19,3 | 0,99 | 0,96 | 0,96 | Ótimo |
| Brody (1945) | 3993,2 | 52,9 | 0,97 | 0,73 | 0,71 | Bom |
| Bertalanffy (1957) | 1001,8 | 22,5 | 0,99 | 0,96 | 0,95 | Ótimo |
| Garcia e Garcia (2002) | 1357,6 | 27,7 | 0,99 | 0,92 | 0,91 | Ótimo |
| ----- P ----- | | | | | | |
| Streibig (1988) | 3024,0 | 45,9 | 0,99 | 0,78 | 0,77 | Muito Bom |
| Gompertz e Philos (1825) | 3490,3 | 49,5 | 0,99 | 0,73 | 0,72 | Bom |
| Ratkowsky (1983) | 2863,5 | 44,6 | 0,99 | 0,81 | 0,78 | Muito Bom |
| Brody (1945) | 59810,4 | 94,4 | 0,97 | 0,11 | 0,10 | Péssimo |
| Bertalanffy (1957) | 4820,6 | 57,5 | 0,96 | 0,61 | 0,59 | Sofrível |
| Garcia e Garcia (2002) | 3025,5 | 45,9 | 0,88 | 0,73 | 0,64 | Mediano |

FONTE: O autor (2019)

FIGURA 2.1 – PRODUTIVIDADE DE BIOMASSA SECA PARA A SOJA, OBSERVADA (SAFRA “CASTRO 07/08”) E ESTIMADA COM SEIS MODELOS, EMPREGANDO A MÉDIA DOS PARÂMETROS “a”, “b” E “c” OBTIDOS NO PROCESSO DE CALIBRAÇÃO NA REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, PARA AS VARIÁVEIS DE ENTRADA: a) DIAS APÓS O PLANTIO (DAP); b) GRAUS DIAS ACUMULADO (GDA); c) RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE ACUMULADA (Rs); E, d) PRECIPITAÇÃO ACUMULADA (P).



FONTE: O autor (2019).

2.5.3.2 Validação dos modelos para a cultura do milho

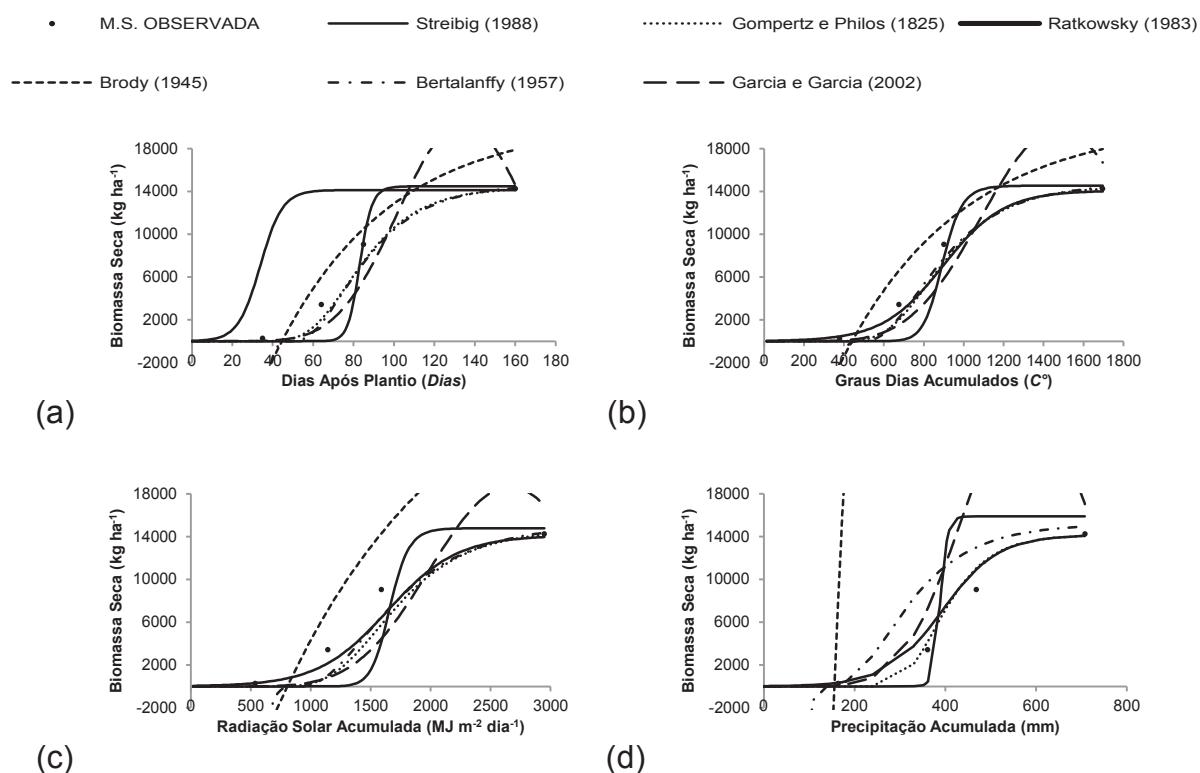
Entre todos os modelos e variáveis analisados (TABELA 2.7), o modelo Brody (1945) obteve desempenho “péssimo” para a variável precipitação e o modelo Ratkowsky (1983) obteve desempenho “mau” para a variável dias após o plantio. Os demais modelos tiveram desempenho entre “bom” e “ótimo”. Como ocorreu para a cultura da soja, no ajuste individual dos modelos, observou-se nos modelos Brody (1945) e Bertalanffy (1957) que os valores de biomassa seca no início do ciclo da cultura foram negativos para as todas as variáveis analisadas (Figura 2.2). Logo, a utilização dos modelos Brody (1945) e Bertalanffy (1957) deve ser restrita a certo intervalo.

TABELA 2.7. ERROS ABSOLUTO (Ea) E RELATIVO (Er), COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO (R), ÍNDICES “ d ” DE WILLMOTT et al. (1982), “ c ” DE CAMARGO E SENTELHAS (1997) E DESEMPENHO, ENTRE A BIOMASSA SECA OBSERVADA E ESTIMADA NOS QUATRO ESTÁDIOS FENOLÓGICOS, PARA A CULTURA DA MILHO, NA SAFRA CASTRO 2007/2008b E MODELOS ANALISADOS.

| Modelo | Ea (kg ha ⁻¹) | Er (%) | R | “ d ” ----- (adimensional) ----- | “ c ” | Desempenho |
|--------------------------|--------------------------------|-------------|------|---------------------------------------|---------|------------|
| ----- DAP ----- | | | | | | |
| Streibig (1988) | 1075,6 | 18,0 | 0,98 | 0,98 | 0,95 | Ótimo |
| Gompertz e Philos (1825) | 839,3 | 14,2 | 0,99 | 0,99 | 0,98 | Ótimo |
| Ratkowsky (1983) | 5846,6 | 46,7 | 0,70 | 0,60 | 0,42 | Mau |
| Brody (1945) | 2933,7 | 38,4 | 0,97 | 0,94 | 0,92 | Ótimo |
| Bertalanffy (1957) | 3025,1 | 80,8 | 0,97 | 0,90 | 0,87 | Ótimo |
| Garcia e Garcia (2002) | 1511,9 | 27,9 | 0,97 | 0,97 | 0,94 | Ótimo |
| ----- GDA ----- | | | | | | |
| Streibig (1988) | 1301,1 | 23,3 | 0,98 | 0,97 | 0,95 | Ótimo |
| Gompertz e Philos (1825) | 857,5 | 14,6 | 0,99 | 0,99 | 0,98 | Ótimo |
| Ratkowsky (1983) | 776,0 | 12,8 | 0,99 | 0,99 | 0,98 | Ótimo |
| Brody (1945) | 2802,0 | 33,8 | 0,97 | 0,95 | 0,92 | Ótimo |
| Bertalanffy (1957) | 1270,7 | 23,0 | 1,00 | 0,98 | 0,98 | Ótimo |
| Garcia e Garcia (2002) | 1936,5 | 32,1 | 0,96 | 0,96 | 0,92 | Ótimo |
| ----- Rs ----- | | | | | | |
| Streibig (1988) | 2285,5 | 48,4 | 0,93 | 0,93 | 0,87 | Ótimo |
| Gompertz e Philos (1825) | 1551,8 | 29,9 | 0,97 | 0,96 | 0,93 | Ótimo |
| Ratkowsky (1983) | 1054,1 | 18,5 | 0,98 | 0,98 | 0,96 | Ótimo |
| Brody (1945) | 7071,9 | 69,7 | 0,98 | 0,81 | 0,79 | Muito Bom |
| Bertalanffy (1957) | 4732,3 | 228,5 | 0,95 | 0,80 | 0,76 | Muito Bom |
| Garcia e Garcia (2002) | 2539,2 | 45,8 | 0,93 | 0,94 | 0,87 | Ótimo |
| ----- P ----- | | | | | | |
| Streibig (1988) | 2937,8 | 36,5 | 0,92 | 0,91322 | 0,84 | Muito Bom |
| Gompertz e Philos (1825) | 808,9 | 11,1 | 0,99 | 0,99016 | 0,98 | Ótimo |
| Ratkowsky (1983) | 996,1 | 13,0 | 0,98 | 0,98455 | 0,97 | Ótimo |
| Brody (1945) | 123690,9 | 94,8 | 0,91 | 0,08558 | 0,08 | Péssimo |
| Bertalanffy (1957) | 2793,3 | 29,7 | 0,89 | 0,89515 | 0,80 | Muito Bom |
| Garcia e Garcia (2002) | 4301,5 | 39,3 | 0,89 | 0,82104 | 0,73 | Bom |

FONTE: O autor (2019)

FIGURA 2.2 – PRODUTIVIDADE DE BIOMASSA SECA PARA O MILHO, OBSERVADA (SAFRA “CASTRO 07/08b”) E ESTIMADA COM SEIS MODELOS, EMPREGANDO A MÉDIA DOS PARÂMETROS “a”, “b” E “c” OBTIDOS NO PROCESSO DE CALIBRAÇÃO NA REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, PARA AS VARIÁVEIS DE ENTRADA: a) DIAS APÓS O PLANTIO (*DAP*); b) GRAUS DIAS ACUMULADO (*GDA*); c) RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE ACUMULADA (*Rs*); E, d) PRECIPITAÇÃO ACUMULADA (*P*).



FONTE: O autor (2019).

2.6 CONCLUSÕES

Com exceção da variável *GDA*, safras de soja que tiveram maior *DAP*, *Rs* e *P* para atingir o estágio de maturação fisiológica não foram as que obtiveram maior produtividade final de biomassa seca. O ciclo da cultura da soja diminuiu à medida que a semeadura foi realizada em datas mais tardias. A associação do acúmulo da biomassa seca das culturas e variáveis testadas foi satisfatória na calibração.

Com exceção do desempenho dos modelos para a precipitação (entre “péssimo” e “muito bom”) para a cultura da soja e milho, as demais variáveis apresentaram desempenhos promissores entre “mau” e “ótimo”, predominantemente “ótimo”.

A ocorrência de valores negativos de biomassa seca estimada no início das safras com os modelos Brody e Bertalanffy indicou restrição à sua utilização. Mesmo

com bons ajustes na calibração para a soja e milho, a validação indicou altos erros absolutos e relativos nas safras.

2.7 REFERÊNCIAS

ARNOLD, C. Y. The determination and significance of the base temperature in a linear heat unit system. **Proceedings of the American Society for Horticultural Science**, Alexandria, v. 74, n.1 p. 430-445, 1959.

BERTALANFFY, L. Quantitative laws in metabolism and growth. **Quarterly Review of Biology**, v. 32, n. 3, p. 217-230, 1957.

BRODY, S. Bioenergetics and Growth. **Rheinhold Publishing**, New York, 1945.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CAMPOS, C. G. C.; MALINOVSKI, L. I.; VIEIRA, H. J.; SILVA, A. L. D. Global solar radiation interception by grapevines trained to a vertical trellis system. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 38, n. 3, e-689. Epub August 11, 2016.

CAMPOS, L. H. F.; MELLO, M. S. C.; CARVALHO, S. J. P.; NICOLAI, M.; CHRISTOFFOLETI, P. J. Crescimento inicial de *Merremia cissoides*, *Neonotonia wightii* e *Stizolobium aterrimum*. **Planta Daninha**, v. 30, n. 3, p. 497-504, 2012.

CHUKWUJINDU, N. S. A comprehensive review of empirical models for estimating global solar radiation in Africa. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 78, p. 955-995, 2017.

COSTA, J. A.; MARCHEZAN, E. **Características dos estádios de desenvolvimento da soja**. Campinas, Fundação Cargill. 1982. 30p.

COSTA, J. R. da; PINHO, J. L. N. de; PARRY, Ma. M. Produção de matéria seca de cultivares de milho sob diferentes níveis de estresse hídrico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 5, p. 443-450, 2008.

DALLACORT, R.; DE FREITAS, P. S. L.; DE FARIA, R. T.; GONÇALVES, A. C. A.; REZENDE, R.; BERTONHA, A. Utilização do modelo Cropgro-soybean na determinação de melhores épocas de semeadura da cultura da soja, na região de Palotina, Estado do Paraná. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 28, n. 4, 2006.

DAVIS, K. F.; GEPHART, J. A.; EMERY, K. A.; LEACH, A. M.; GALLOWAY, J. N.; D'ODORICO, P. Meeting future food demand with current agricultural resources. **Global Environmental Change**, v. 39, p. 125-132, 2016.

EMBRAPA - Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária / Fundação ABC. **Mapa do levantamento semi-detalhado de solos**: Município de Castro. Elaborado por: FASOLO, P. J.; CARVALHO, A. P.; BOGNOLA, I. A.; POTER, R. O., 2001.

EMBRAPA - Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.

EMBRAPA - Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária. **Manual de segurança e qualidade para a cultura do milho**. Brasília: Embrapa/Sede, 2004. 78 p

EMBRAPA - Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária. **Tecnologias de Produção de Soja** – Região Central do Brasil 2014. Londrina: Embrapa Soja, 2013.

FANCELLI, A.L.; DOURADO-NETO, D. Produção de milho. **Guaíba: Agropecuária**, 2000. 360p.

FIETZ, C. R.; URCHEI, M. A. Deficiência hídrica da cultura da soja na região de Dourados, MS. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande , v. 6, n. 2, p. 262-265, 2002.

GARCIA E GARCIA, A. **Modelos para área foliar, fitomassa e extração de nutrientes na cultura de arroz**. 112 f. Tese – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

GOMES, A. C. dos S.; ROBAINA, A. D.; PEITER, M. X.; SOARES, F. C.; PARIZI, A. R. C. Modelo para estimativa da produtividade para a cultura da soja. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 44, n. 1, p. 43-49, 2014.

GOMPERTZ, B.; PHILOS, T. **Roy Soc London**. 115-513. 1825.

GREIN, M. A.; NEVES, L. O.; IELER, J.; MELO, L. C.; GUTZ, T. **Necessidade térmica para a cultura da soja para o Alto Vale do Itajaí – SC**. Trabalho apresentado na 8ª Mostra Nacional de Iniciação Científica e Tecnológica Interdisciplinar, Santa Rosa do Sul, 2015.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Agropecuário**; 2018. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/economicas/agricultura-e-pecuaria.html>>. Acesso em 13 dez 2018.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. Organizador José Eduardo B. A Monteiro – Brasília, DF: INMET, 2009.

JOHANN, J. A.; ROCHA, J. V.; DUFT, D. G.; LAMPARELLI, R. A. C. Estimativa de áreas com culturas de verão no Paraná, por meio de imagens multitemporais EVI/Modis. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília , v. 47, n. 9, p. 1295-1306. 2012.

JONES, J. W.; ANTLE, J. M.; BASSO, B.; BOOTE, K. J.; CONANT, R. T.; FOSTER, I.; GODFRAY, H. C. J.; HERRERO, M.; HOWITT, R. E.; JANSSEN, S.; KEATING, B. A.; CARPENA, R. M.; PORTER, C. H.; ROSENZWEIG, C.; WHEELER, T. R. Brief history of agricultural systems modeling. **Agricultural Systems**, v. 155, p. 240-254, 2017.

MAIA, E.; SIQUEIRA, D. L.; SILVA, F. F.; PETERNELLI, L. A.; SALOMÃO, L. C. C. Método de comparação de modelos de regressão não-lineares em bananeiras. **Ciência Rural**, v.39, n.5, p.1380-1386, 2009.

MALDANER, L. J.; HORING, K.; SCHNEIDER, J. F.; FRIGO, J. P.; AZEVEDO, K. D. DE; GRZESIUCK, A. E. Exigência agroclimática da cultura do milho (*Zea mays*). **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 3, p. 13-23, 2014.

OMETTO, J. C. Bioclimatologia vegetal. São Paulo: **Agronômica Ceres** 1981. 440p.

PALENCIA, P.; MARTÍNEZ, F.; MEDINA, J. J.; LÓPEZ-MEDINA, J. Strawberry yield efficiency and its correlation with temperature and solar radiation. **Horticultura Brasileira**, v. 31, n. 1, p. 93-99, 2013.

PEIXOTO, C. P.; PEIXOTO, M. F. S. P. **Dinâmica do Crescimento Vegetal**. Universidade Federal da Bahia, Cruz das Almas, 2004.

PÔRTO, D. R. de Q.; CECILIO FILHO, A. B.; MAY, A.; VARGAS, P. F. Acúmulo de macronutrientes pela cultivar de cebola Superex estabelecida por semeadura direta. **Ciência Rural**, v. 37, p. 949-955, 2007.

RATKOWSKY, D. A. Nonlinear regression modeling: a unified practical approach. **Marcel Dekker**, New York, 1983.

RITCHIE, S. W.; HANWAY, J. J.; BENSON, G. O. How a corn plant develops. **Special Bulletin**, Iowa, n. 48. 1993.

SANTOS, H. P. **Aspectos ecofisiológicos na condução da videira e sua influência na produção de vinhedo e na qualidade dos vinhos**. Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 2006. 9p.

SILVA, A.P.P.; MARQUES, B.S.; LIMA, R.S.O.; MACHADO, E.C.R.; GONÇALVES, M.F.; CARVALHO, S.J.P. Crescimento e desenvolvimento de plantas daninhas com base em dias ou unidades térmicas. **Planta Daninha**, v. 32, n. 1, p. 81-89, 2014.

SILVA, V. DE P. R. DA; SILVA, R. A. E; MACIEL, G. F.; BRAGA, C. C.; SILVA JÚNIOR, J. L. C. DA; SOUZA, E. P. DE; ALMEIDA, R. S. R.; SILVA, M. T.; HOLANDA, R. M. DE. Calibration and validation of the AquaCrop model for the soybean crop grown under different levels of irrigation in the Motopiba region, Brazil. **Ciência Rural**, v. 48, n. 1, e20161118, 2018.

SOUZA, P. J. O. P.; ABREU, J. P. M. M.; ROCHA, E. J. P.; RIBEIRO, A. Exigência térmica da soja nas condições climáticas da Amazônia. XVI CBMET - Congresso Brasileiro de Meteorologia. **Anais - Agrometeorologia, Micrometeorologia e Hidrometeorologia**. 2010.

STREIBIG, J. C. Herbicide bioassay. **Weed Res.**, v. 28, n. 6, p. 479-484, 1988.

Trnka, M.; Eitzinger, J.; Kapler, P.; Dubrovský, M.; Semerádová, D.; Žalud, Z. ěk; Formayer, H. Effect of Estimated Daily Global Solar Radiation Data on the Results of Crop Growth Models. **Sensors** (Basel, Switzerland), v. 7, n. 10, p. 2330–2362, 2007.

VITOUSEK, P. M.; MOONEY, H.A.; LUBCHENCO, J.; MELILLO, J.M. Human domination of earth's ecosystems. **Science**, v. 277, p. 494-499, 1997.

WAZILEWSKI, W. T.; SANTOS, R. F.; BASSEGIO, D. Exigência térmica da cultura da soja para a região de Cascavel - Paraná. **Revista Cultivando o Saber**. Cascavel-PR, v.4, n.3, p.130-139, 2011.

WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; O'DONNELL, J. & ROWE, C. M. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, v. 90, n. 5, p. 8995-9005, 1985.

WISLIE, C. P. Crop adaptation and distribution. **São Francisco**: W. H. Freeman and Company, 1962.

3 CAPÍTULO II – CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DE MODELOS PARA A ESTIMATIVA DA BIOMASSA SECA PARA CULTURAS DE INVERNO NA REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS: TRIGO E CEVADA

3.1 RESUMO

Teve-se por objetivo no presente trabalho calibrar e validar modelos recomendados para estimar a produtividade de biomassa seca das culturas cevada e trigo na região dos Campos Gerais, tendo como variáveis a radiação solar incidente (Rs), graus dias acumulados (GDA), dias após o plantio (DAP) e precipitação (P). Os experimentos foram realizados nas estações experimentais da Fundação ABC, nas safras 2007 e 2008, em Castro e Ponta Grossa, em que foram coletadas amostras de planta inteira, em quatro estádios fenológicos das culturas, para obtenção da biomassa seca das culturas cevada e trigo. Os dados climáticos necessários são das estações agrometeorológicas próximas às áreas experimentais. O ajuste dos parâmetros foi realizado com o Método dos Mínimos Quadrados e Ferramenta *Solver* de uma planilha eletrônica. Com exceção do modelo Brody, a associação do acúmulo da biomassa seca das culturas e variáveis testadas (DAP , GDA e RS) foi satisfatória na calibração para o trigo ($R^2 > 0,8$) e cevada ($R^2 > 0,9$). A P proporcionou maior variabilidade ($R^2 > 0,64$ para o trigo e $R^2 > 0,67$ para a cevada). Com exceção do desempenho dos modelos para a precipitação com as culturas do trigo (entre “péssimo” e “muito bom”) e cevada (entre “mediano” e “bom”), as demais variáveis apresentaram desempenho promissores entre “mau” e “ótimo”, predominantemente “bom” e “muito bom”. A ocorrência de valores negativos de biomassa seca estimada no início das safras com os modelos Brody e Bertalanffy indicou restrição à sua utilização. Mesmo com bons ajustes na calibração para trigo e cevada, a validação indicou altos erros absolutos e relativos para todas as safras.

Palavras-chave: Cultivo agrícola, Modelos de crescimento, Fatores ambientais, *Triticum aestivum*, *Hordeum vulgare*.

3.2 ABSTRACT

The aim of this study was to calibrate and validate models to estimate the dry biomass yield of barley and wheat crops in the Campos Gerais region, with the following variables: incident solar radiation (R_s), growing degree days (GDD), days after planting (DAP) and precipitation (P). The experiments were carried out in the experimental stations of the ABC Foundation, in the 2007 and 2008 harvests, in Castro and Ponta Grossa, where whole plant samples were collected in four phenological stages to obtain the dry biomass of the barley and wheat crops. The required climatic data are from the agrometeorological stations near the experimental areas. The parameter adjustment was performed using the Least Squares Method and *Solver* tool of a spreadsheet. Except for the Brody model, the association between dry biomass accumulation and tested variables (DAP , GDD and R_s) was satisfactory in the calibration for wheat ($R^2 > 0,8$) and barley ($R^2 > 0.9$). P provided higher variability ($R^2 > 0.64$ for wheat and $R^2 > 0.67$ for barley). Except for the performance of the models for precipitation with wheat (between "bad" and "very good") and barley (between "medium" and "good"), the other variables presented promising results from "bad" to "great", predominantly "good" and "very good". The occurrence of negative values of dry biomass estimated at the beginning of the seasons with the models Brody and Bertalanffy indicated a restriction to their use. Even with good calibration adjustments for wheat and barley, validation indicated high absolute and relative errors for all crops.

Keywords: Agricultural crops, Growth models, Environmental factors, *Triticum aestivum*, *Hordeum vulgare*.

3.3 INTRODUÇÃO

A intensificação sustentável envolve o aumento dos rendimentos agrícolas, minimizando os impactos ambientais. Davis et al. (2016) considerou que se as tendências alimentares atuais continuarem, melhorias serão insuficientes para evitar os impactos ambientais da agricultura. Como em várias outras regiões do mundo, a demanda de alimentos na África Ocidental tem crescido rapidamente e alterando seu arranjo nos últimos 30 anos (Zhou e Staatz, 2016). A balança comercial de alimentos destes países, que estava em equilíbrio desde meados de 1980, tornou-se intensamente negativa a partir do ano 2000, quando houve o crescimento de renda na região e a demanda por alimento ultrapassou a produção. Apesar do crescimento de renda e da população, as principais causas da mudança da demanda de alimentos parecem ser as mudanças no estilo de vida associados à globalização e a rápida urbanização da região (Hollinger e Staatz, 2015).

As mudanças climáticas, especialmente o aumento da temperatura, podem afetar drasticamente os diversos sistemas de cultivo. Yang et al., (2015) concluiu que, devido ao aquecimento causado pelas mudanças climáticas, houve impacto positivo na produção de culturas na China. Os impactos causados por mudanças climáticas, o uso da terra e o meio ambiente causam mudanças no rendimento das culturas. Porém, em muitos estudos, os impactos assumem que o manejo das culturas permanece inalterado, sendo que os agricultores podem adaptar suas datas de semeadura e adquirir conhecimento de tempo térmico para diminuir as perdas de rendimento ou aumentar a produção (Zimmermann et al., 2017).

É cada vez maior a necessidade de estimar a capacidade produtiva das culturas, tanto para as safras e tratos culturais, como para prováveis efeitos nas técnicas de produção, em que modelos agrometeorológicos e modelos de simulação de cultivos estão sendo cada vez mais aperfeiçoados (Carvalho et al., 2011). Para obter a melhor época na semeadura considerando o acúmulo térmico nas culturas, pesquisas têm buscado relacionar variáveis de crescimento e graus-dia. Os graus-dia é uma estimativa utilizada para caracterizar a resposta de determinada planta, referente ao seu desenvolvimento, em relação à temperatura (Aguiar e Guissem, 2002). Em vista dos fatores que promovem o crescimento e desenvolvimento das plantas, o clima é o que apresenta os maiores desafios para o melhor manejo da cultura, sendo necessários que os aspectos climáticos, como temperatura média,

precipitação e radiação solar estejam em ajuste com as necessidades das culturas (Fancelli e Dourado-Neto, 2000). De acordo com Jones et al. (2017), os usuários de modelos ou informações derivadas deles, e os próprios modelos, variam relativamente em escalas temporais e espaciais. Não necessariamente são os que dirigem os modelos, mas aqueles que querem informações sobre respostas dos sistemas e diferentes maneiras de gerenciá-los sobre quaisquer condições climáticas, físicas, biológicas e socioeconômicas.

Teve-se por objetivo no presente trabalho calibrar e validar modelos recomendados para estimar a produtividade de biomassa seca das culturas cevada e trigo na região dos Campos Gerais, tendo como variáveis a radiação solar incidente (R_s), graus dias acumulados (GDA), dias após o plantio (DAP) e precipitação (P).

3.4 MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo localiza-se na Região dos Campos Gerais, Estado do Paraná, em duas cidades: i) Ponta Grossa, com um Latossolo Vermelho Distrófico típico (EMBRAPA, 2006) de textura argilo arenosa (450 g kg^{-1} de argila, 450 g kg^{-1} de areia e 100 g kg^{-1} de silte), com relevo suave ondulado e clima subtropical úmido (Cfb), segundo Köppen. As coordenadas geográficas próximas dos locais dos experimentos são $25^{\circ}00'53'' \text{ S}$ e $50^{\circ}09'07'' \text{ W}$; ii) Castro, com um Latossolo Bruno Distrófico típico ácrico A proeminente (EMBRAPA/FABC, 2001), textura muito argilosa, com declividade de 9,6%. O clima local é subtropical (Cfb), segundo Köppen. As coordenadas geográficas próximas dos locais dos experimentos são $24^{\circ}51'50'' \text{ S}$ e $49^{\circ}56'25'' \text{ W}$. Ponta Grossa e Castro apresentam, respectivamente, temperatura média de $17,5^{\circ}\text{C}$ e $16,9^{\circ}\text{C}$ e precipitação média de 1495 mm e 1553 mm por ano.

Os dados de crescimento e desenvolvimento dos cultivos trigo e cevada são de experimentos realizado nos municípios de Ponta Grossa e Castro, nas estações experimentais da Fundação ABC, nas safras 2007 e 2008. Para as culturas trigo e cevada foram instaladas cinco e seis áreas experimentais, respectivamente (TABELA 3.1).

As cultivares utilizadas, datas de semeadura e local de cada safra encontram-se na TABELA 3.2. Nas áreas experimentais, foram coletadas quatro amostras de plantas inteiras para a determinação da biomassa aérea, em cada estágio fenológico determinado para cada cultura: perfilhamento (PE), emborrachamento (EM), pleno florescimento (PF) e maturação fisiológica (MF). Para todas as culturas, as plantas foram coletadas à aproximadamente 1 cm da superfície do solo.

TABELA 3.1 – NÚMERO DE EXPERIMENTOS CONDUZIDOS POR CULTURA, COM IDENTIFICAÇÃO DE SAFRA E LOCAL DE INSTALAÇÃO.

| Cultura | -----Local/Safra----- | | | | Total |
|---------|-----------------------|------|--------------|------|-------|
| | Castro | | Ponta Grossa | | |
| | 2007 | 2008 | 2007 | 2008 | |
| Trigo | 1 | 2 | 1 | 1 | 5 |
| Cevada | 1 | 2 | 1 | 2 | 6 |

FONTE: O autor (2019)

TABELA 3.2 – CULTIVARES E DATA DA SEMEADURA DE ACORDO COM O LOCAL E SAFRA DE CULTIVO.

| Cultura | Cultivar | Local | Safra | Semeadura |
|---------|----------|--------------|--------|------------|
| Cevada | BRS 195 | Castro | 2007 | 04/06/2007 |
| | BRS 195 | Ponta Grossa | 2007 | 25/05/2007 |
| | BRS 195 | Castro | 2008 a | 23/05/2008 |
| | BRS 195 | Castro | 2008 b | 11/06/2008 |
| | BRS 195 | Ponta Grossa | 2008 a | 06/05/2008 |
| | BRS 195 | Ponta Grossa | 2008 b | 23/05/2008 |
| Trigo | Avante | Castro | 2007 | 04/06/2007 |
| | Avante | Ponta Grossa | 2007 | 25/05/2007 |
| | Avante | Castro | 2008 a | 23/05/2008 |
| | Avante | Castro | 2008 b | 11/06/2008 |
| | Avante | Ponta Grossa | 2008 | 23/05/2008 |
| | | | | |

FONTE: O autor (2019)

No último estágio, as plantas foram coletadas e divididas em grãos e o restante em biomassa aérea. Após o corte, as plantas foram pesadas a campo para quantificar a biomassa fresca. Todo o material coletado e pesado foi enviado ao laboratório para secagem em estufa a 70 °C até peso constante, para quantificação da biomassa seca, para os dois primeiros estágios fenológicos. Para os dois estágios finais, devido ao volume de material coletado, uma amostra de plantas inteiras que foram pesadas frescas foi separada e enviada ao laboratório para

devida secagem. Com os dados da biomassa fresca total da área coletada, e com a determinação da umidade da amostra, calculou-se a biomassa por hectare.

No estudo, foram ajustados os parâmetros dos modelos: Streibig (1988), Gompertz e Philos (1825), Ratkowsky (1983), Brody (1945), Bertalanffy (1957) e Garcia e Garcia (2002). O ajuste foi realizado com o Método dos Mínimos Quadrados e Ferramenta *Solver* de uma planilha eletrônica. Após o ajuste individual para cada safra, verificou-se o desempenho dos modelos e selecionaram-se os melhores, sendo realizada a calibração com pelo menos três safras de locais e anos diferentes. Posteriormente, foi realizada a validação de cada modelo com safras não utilizadas na calibração

- Calibração para o trigo: Safras “Castro 2007”, “Castro 2008a” e “Ponta Grossa 2008”;
- Calibração para a cevada: “Castro 2007”, “Castro 2008a” e “Ponta Grossa 2008a”;
- Validação para o trigo: “Safr Castro 2008b” e “Ponta Grossa 2007”;
- Validação para a cevada: “Castro 2008b”, “Ponta Grossa 2007” e “Ponta Grossa 2008b”).

Os modelos consideram a entrada das variáveis: dias após o plantio (*DAP*), graus dia acumulados (*GDA*), radiação solar incidente acumulada (*RS*) e precipitação acumulada (*P*). Os dados climáticos foram obtidos em estações climatológicas dispostas próximas aos locais do experimento.

- Modelo logístico não linear, proposto por Streibig (1988):

$$y(x_i) = \frac{a}{\left[1 + \left(\frac{x_i}{c}\right)^b\right]} \quad (3.1)$$

- Modelo não linear, proposto por Gompertz e Philos (1825):

$$y(x_i) = a \cdot \exp[-b \cdot \exp(-c \cdot x_i)] \quad (3.2)$$

- Modelo não linear, proposto por Ratkowsky (1983):

$$y(x_i) = \frac{a}{1 + b \cdot e^{(-c \cdot x_i)}} \quad (3.3)$$

- Modelo não linear, proposto por Brody (1945):

$$y(x_i) = a \cdot (1 - b \cdot e^{(-c \cdot x_i)}) \quad (3.4)$$

– Modelo não linear, proposto por Bertalanffy (1957):

$$y(x_i) = a \cdot \left(1 - b \cdot e^{(-c \cdot x_i)}\right)^3 \quad (3.5)$$

– Modelo do tipo sigmoidal, proposto por Garcia e Garcia (2002):

$$y(x_i) = a \cdot \left\{ \frac{1}{2} \cdot \left[\operatorname{sen} \left(\frac{3 \cdot \pi}{2} + \pi \cdot \frac{x_i}{c} \right) + 1 \right] \right\}^b \quad (3.6)$$

Sendo: $y(x_i)$ – biomassa seca total em função da variável x (kg ha^{-1}); x_i – valor da variável independente, sendo avaliado no presente estudo os i -ésimo dias após o plantio (D ; dia), graus dias acumulados até o i -ésimo dia (GD_i ; $^{\circ}\text{C}$), radiação solar incidente acumulada até o i -ésimo dia (Rs_i ; $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$) e precipitação acumulada até o i -ésimo dia (P_i ; mm dia^{-1}); a , b e c – parâmetros da equação (a – kg ha^{-1} ; b – adimensional; c – mesma unidade da variável independente).

Os graus dias acumulados foram calculados com o somatório:

$$GDA_i = \sum_{i=1}^n GD_i \quad (3.7)$$

Sendo: GDA_i – graus dia acumulados no i -ésimo dia ($^{\circ}\text{C}$); GD_i – graus-dia no i -ésimo dia ($^{\circ}\text{C}$).

Os graus-dia foram calculados com o método proposto por Arnold (1959), que considera apenas a temperatura basal inferior (T_{basal}) no cálculo dos graus-dia:

$$GD_i = \frac{(T_{máx} + T_{mín})}{2} - T_{basal} \quad (3.8)$$

A temperatura basal é a temperatura mínima necessária para ativar processos metabólicos das plantas. Somente acima da T_{basal} há desenvolvimento (Ometto, 1981). Considerou-se no presente trabalho 5°C e 0°C as temperaturas mínimas necessárias ao desenvolvimento das cultivares de trigo (Doorenbos e Kassam 1979) e cevada (Gear, 2005; Savin et al., 1997), respectivamente.

3.4.1 Análises Estatísticas

As associações entre os valores observados (reais) e estimados (com os modelos) foram verificadas em análises de regressão linear simples. Para comparação, foram calculados os erros absolutos (Ea) e relativos (Er), coeficiente de

determinação (R^2) e correlação de Pearson (R), índice de concordância “ d ” (Willmott et al., 1985), que indica como os pontos medidos e estimados estão afastados da reta 1:1, e índice “ c ” (Camargo e Sentelhas, 1997), que mede o desempenho do modelo:

$$Ea = \frac{\sum_{i=1}^n |Y_{oi} - Y_{ei}|}{n} \quad (3.9)$$

$$Er = \frac{\sum_{i=1}^n |Y_{oi} - Y_{ei}|}{\sum_{i=1}^n Y_{ei}} \cdot 100 \quad (3.10)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n [(Y_{oi} - \bar{Y}_o) \cdot (Y_{ei} - \bar{Y}_e)]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_{oi} - \bar{Y}_o)^2 \cdot \sum_{i=1}^n (Y_{ei} - \bar{Y}_e)^2}} \quad (3.11)$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{ei} - Y_{oi})^2}{\sum_{i=1}^n \left(|Y_{ei} - \bar{Y}_o| + |Y_{oi} - \bar{Y}_e| \right)^2} \right] \quad (3.12)$$

$$c = d \cdot r \quad (3.13)$$

Sendo: Ea – erro absoluto médio (kg ha^{-1}); Er – erro relativo (%); r – coeficiente de correlação de Pearson (adimensional); d – índice de concordância de Willmott et al. (1985) (adimensional); c – índice “ c ” de desempenho proposto por Camargo e Sentelhas (1997) (adimensional); Y_{oi} – produtividade observada no i -ésimo dia (kg ha^{-1}); Y_{ei} – produtividade estimada no i -ésimo dia (kg ha^{-1}); \bar{Y}_o – média da produtividade observada (kg ha^{-1}); \bar{Y}_e – média da produtividade estimada (kg ha^{-1}); n – número de dias da cultura (adimensional).

Os valores do índice “ c ” indicam o seguinte desempenho do modelo testado: “ótimo” (“ c ” > 0,85); “muito bom” ($0,76 \leq “c” \leq 0,85$); “bom” ($0,66 \leq “c” \leq 0,75$); “mediano” ($0,61 \leq “c” \leq 0,65$); “sofrível” ($0,51 \leq “c” \leq 0,60$); “mau” ($0,41 \leq “c” \leq 0,50$); e, “péssimo” (“ c ” $\leq 0,40$).

3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.5.1 Biomassa seca real e variáveis de entrada nos modelos

As safras da cultura do trigo que tiveram maior período de dias após o plantio (*DAP*) para atingir o estágio de maturação fisiológica não foram as que obtiveram a maior produtividade final de biomassa seca (TABELA 3.3). A safra “Castro 08a” (9785 kg ha^{-1}) obteve a maior produtividade, e foi a que teve o menor acúmulo de radiação solar incidente (*Rs*) e menor acúmulo de graus dias acumulados (*GDA*), e onde a precipitação acumulada (*P*) foi a segunda maior entre as cinco safras analisadas. As safras da cultura da cevada que tiveram maior período de dias após o plantio (*DAP*) para atingir o estágio de maturação fisiológica também não foram as que obtiveram a maior produtividade final de biomassa seca (TABELA 3.3). A safra “Ponta Grossa 08a” ($11309,71 \text{ kg ha}^{-1}$) foi a mais produtiva e, apesar disso, não teve os maiores e menores valores das variáveis em estudo.

No estágio fenológico perfilhamento (PE), a maior produtividade de biomassa seca da cultura do trigo ocorreu na safra “Ponta Grossa 08”. A safra foi a que teve os maiores valores das variáveis, tendo 45 dias após o plantio (*DAP*), $460,8^\circ\text{C}$ graus dias acumulados (*GDA*), $535,9 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ de radiação solar incidente acumulada (*Rs*) e 162 mm de precipitação acumulada (*P*). A menor produtividade no estágio PE foi observada na safra “Castro 07”, sendo que os valores das variáveis foram relativamente bons, com exceção da variável precipitação acumulada. Em 32 dias a campo, a cultura recebeu apenas 1,2 mm de precipitação, explicando o baixo acúmulo de biomassa seca na cultura. Para a cultura da cevada, no mesmo estágio, a maior produtividade ocorreu na safra “Castro 08b”. Com 37 dias após o plantio (*DAP*), o estágio teve o menor graus dias acumulados ($GDA = 509,55^\circ\text{C}$), o segundo menor acúmulo de radiação solar incidente ($Rs = 387 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), e a terceira menor precipitação acumulada ($P = 75\text{mm}$).

No estágio fenológico emborrachamento (EM), a maior produtividade de biomassa seca da cultura do trigo ocorreu na safra “Castro 08b”. Com apenas dois dias a mais a campo em relação a safra “Castro 08a”, houve aumento de 814 kg ha^{-1} . A variável graus dias acumulados teve $48,55^\circ\text{C}$ a mais e a precipitação acumulada aumentou 46,4 mm entre as safras. Mas o que se destaca foi a variável radiação solar incidente acumulada, que foi superior $101,7 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ entre as safras. Logo, optando por determinada época de semeadura, a escolha certa do

produtor entre a fenologia da cultura e a distribuição dos elementos do clima de determinada região poderá resultar em rendimentos elevados ou reduzidos (Peixoto et al., 2000). No mesmo estágio fenológico, a maior produtividade da biomassa seca da cultura da cevada ocorreu na safra “Ponta Grossa 08a”. Com 84 dias após o plantio (*DAP*), observou-se o maior valor da variável graus dias acumulados ($GDA = 1328,4^{\circ}\text{C}$) e o maior valor da radiação solar incidente acumulada ($Rs = 1127,3 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$). Contudo, a precipitação acumulada foi a quarta maior apenas, com 211,4 mm acumulados. A safra “Castro 08a”, que ficou seis dias a mais a campo que a safra “Ponta Grossa 08a”, obteve $478,33 \text{ kg ha}^{-1}$ a menos na de biomassa seca acumulada no estágio de emborrachamento. Mesmo com seis dias de diferença, a safra com maior acúmulo de biomassa apresentou maiores valores de graus dias acumulados (GDA) e radiação solar incidente acumulada (Rs), e menor valor de precipitação acumulada.

No estágio pleno florescimento (PF), o maior acúmulo de biomassa seca da cultura do trigo ocorreu na safra “Castro 08a”. A safra foi a que mais permaneceu a campo para atingir o estágio “PF” e a que mais teve graus dia acumulados ($GDA = 975,55^{\circ}\text{C}$). No entanto, não apresentou os maiores valores de radiação solar incidente acumulada (Rs) e precipitação acumulada (P). No estágio pleno florescimento (PF), o maior acúmulo de biomassa seca da cultura da cevada ocorreu na safra “Ponta Grossa 08a”. Entretanto, não foi a safra que mais permaneceu a campo para atingir o estágio de pleno florescimento. No estágio “PF” os maiores valores das variáveis graus dia acumulados (GDA) e radiação solar incidente acumulada (Rs) ocorreram na safra “Castro 07” (TABELA 3.3). Com cinco dias a mais no campo, a safra obteve aumento de $2930,1 \text{ kg ha}^{-1}$, enquanto na safra de maior acúmulo de biomassa seca o aumento foi de $2692,16 \text{ kg ha}^{-1}$. No estágio pleno florescimento, observou-se os menores dias após o plantio (*DAP*) nas safras “Castro 08a” e “Ponta Grossa 08a”. As safras apresentaram, respectivamente, $1485,55^{\circ}\text{C}$ e $1587,60^{\circ}\text{C}$ graus dias acumulados (GDA), $1114,40 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e $1259,40 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ de radiação solar incidente acumulada (Rs) e 365 mm e 356 mm de precipitação acumulada (P). Valores mais altos de graus dias acumulados e radiação solar incidente acumulada aumentaram o acúmulo de biomassa seca entre os estádios de emborrachamento e pleno florescimento.

TABELA 3.3 – BIOMASSA SECA REAL, DIAS APÓS O PLANTIO, GRAUS DIA APÓS O PLANTIO, RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE ACUMULADA E PRECIPITAÇÃO ACUMULADA NO FINAL DE CADA ESTÁDIO FENOLÓGICO DAS CULTURAS DO TRIGO E CEVADA, NAS DIFERENTES SAFRAS, NA REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS.

| Variável | Safr | Estádios fenológicos | | | |
|--|----------------------|----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | | PE ⁽³⁾ | EM ⁽⁴⁾ | PF ⁽⁵⁾ | MF ⁽⁶⁾ |
| ----- Trigo ----- | | | | | |
| Biomassa seca real (kg ha ⁻¹) | C-07 ⁽¹⁾ | 150,00 | 3106,00 | 4954,00 | 7221,00 |
| | P-07 ⁽²⁾ | 294,00 | 1127,00 | 3566,00 | 4740,00 |
| | C-08a ⁽¹⁾ | 198,00 | 2694,00 | 6733,00 | 9785,00 |
| | C-08b ⁽¹⁾ | 290,00 | 3508,00 | 5933,00 | 8777,00 |
| | P-08 ⁽²⁾ | 329,00 | 1704,00 | 2584,00 | 6636,00 |
| Dias após o plantio (dia) | C-07 ⁽¹⁾ | 32 | 72 | 91 | 142 |
| | P-07 ⁽²⁾ | 41 | 67 | 89 | 138 |
| | C-08a ⁽¹⁾ | 20 | 77 | 101 | 139 |
| | C-08b ⁽¹⁾ | 37 | 79 | 92 | 140 |
| | P-08 ⁽²⁾ | 45 | 67 | 90 | 130 |
| Graus dia após o plantio (°C) | C-07 ⁽¹⁾ | 378,20 | 749,40 | 961,15 | 1676,55 |
| | P-07 ⁽²⁾ | 430,65 | 654,00 | 919,15 | 1643,30 |
| | C-08a ⁽¹⁾ | 204,75 | 714,60 | 975,55 | 1360,20 |
| | C-08b ⁽¹⁾ | 319,55 | 763,15 | 905,45 | 1456,10 |
| | P-08 ⁽²⁾ | 460,80 | 707,05 | 971,40 | 1432,35 |
| Radiação solar incidente acumulada (MJ m ⁻² dia ⁻¹) | C-07 ⁽¹⁾ | 470,60 | 1013,60 | 1302,00 | 2107,70 |
| | P-07 ⁽²⁾ | 594,50 | 908,90 | 1284,00 | 2167,00 |
| | C-08a ⁽¹⁾ | 189,20 | 795,50 | 1114,40 | 1634,40 |
| | C-08b ⁽¹⁾ | 387,00 | 897,20 | 1078,20 | 1774,10 |
| | P-08 ⁽²⁾ | 535,90 | 864,70 | 1105,20 | 1813,90 |
| Precipitação acumulada (mm) | C-07 ⁽¹⁾ | 1,20 | 138,90 | 153,30 | 216,80 |
| | P-07 ⁽²⁾ | 5,60 | 140,80 | 140,80 | 186,80 |
| | C-08a ⁽¹⁾ | 87,60 | 249,80 | 365,00 | 516,10 |
| | C-08b ⁽¹⁾ | 75,00 | 296,20 | 306,70 | 521,70 |
| | P-08 ⁽²⁾ | 162,00 | 211,40 | 356,00 | 391,20 |
| ----- Cevada ----- | | | | | |
| Biomassa seca real (kg ha ⁻¹) | C-07 ⁽¹⁾ | 184,85 | 2990,29 | 5920,39 | 7923,04 |
| | P-07 ⁽²⁾ | 339,31 | 2431,37 | 2918,73 | 6645,88 |
| | C-08a ⁽¹⁾ | 252,65 | 3645,10 | 6496,08 | 9555,39 |
| | C-08b ⁽¹⁾ | 515,29 | 3985,59 | 5906,18 | 5991,86 |
| | P-08a ⁽²⁾ | 340,74 | 4123,43 | 6815,59 | 11309,71 |
| | P-08b ⁽²⁾ | 467,40 | 2449,22 | 6234,90 | 10565,20 |
| Dias após o plantio (dia) | C-07 ⁽¹⁾ | 32 | 78 | 106 | 142 |
| | P-07 ⁽²⁾ | 41 | 77 | 97 | 138 |
| | C-08a ⁽¹⁾ | 41 | 90 | 101 | 151 |
| | C-08b ⁽¹⁾ | 37 | 82 | 99 | 161 |
| | P-08a ⁽²⁾ | 37 | 84 | 101 | 147 |
| | P-08b ⁽²⁾ | 45 | 75 | 96 | 139 |
| Graus dia após o plantio (°C) | C-07 ⁽¹⁾ | 543,20 | 1205,70 | 1704,10 | 2391,55 |
| | P-07 ⁽²⁾ | 640,65 | 1166,60 | 1499,55 | 2338,30 |
| | C-08a ⁽¹⁾ | 583,20 | 1316,75 | 1485,55 | 2280,85 |
| | C-08b ⁽¹⁾ | 509,55 | 1200,35 | 1472,45 | 2553,85 |
| | P-08a ⁽²⁾ | 609,95 | 1328,40 | 1587,60 | 2368,70 |
| | P-08b ⁽²⁾ | 690,80 | 1168,10 | 1536,10 | 2239,25 |
| Radiação solar incidente acumulada (MJ m ⁻² dia ⁻¹) | C-07 ⁽¹⁾ | 470,60 | 1125,60 | 1569,10 | 2107,70 |
| | P-07 ⁽²⁾ | 594,50 | 1071,00 | 1382,10 | 2167,00 |
| | C-08a ⁽¹⁾ | 367,30 | 958,00 | 1114,40 | 1812,20 |
| | C-08b ⁽¹⁾ | 387,00 | 938,50 | 1172,60 | 2136,50 |
| | P-08a ⁽²⁾ | 505,70 | 1127,30 | 1259,40 | 2076,50 |
| | P-08b ⁽²⁾ | 535,90 | 929,90 | 1210,60 | 1931,50 |
| Precipitação acumulada (mm) | C-07 ⁽¹⁾ | 1,20 | 140,00 | 153,30 | 216,80 |
| | P-07 ⁽²⁾ | 5,60 | 140,80 | 159,80 | 186,80 |
| | C-08a ⁽¹⁾ | 142,70 | 364,20 | 365,00 | 572,80 |
| | C-08b ⁽¹⁾ | 75,00 | 296,20 | 314,00 | 678,30 |
| | P-08a ⁽²⁾ | 91,60 | 211,40 | 356,00 | 391,20 |
| | P-08b ⁽²⁾ | 162,00 | 240,60 | 356,00 | 510,80 |

⁽¹⁾ Safras obtidas em Castro; ⁽²⁾ Safras obtidas em Ponta Grossa; ⁽³⁾ Estádio Perfilhamento; ⁽⁴⁾ Estádio Emborrachamento; ⁽⁵⁾ Estádio Pleno Florescimento; ⁽⁶⁾ Estádio Maturação Fisiológica. FONTE: O autor (2019).

3.5.2 Calibração dos modelos testados

3.5.2.1 Calibração dos modelos para a cultura do trigo

O resultado da calibração dos modelos testados para os dias após o plantio (*DAP*), graus dias acumulado (*GDA*), radiação solar incidente acumulada (*Rs*) e precipitação acumulada (*P*) para a cultura do trigo encontram-se na Tabela 3.4 e Apêndice 3.

O parâmetro “*a*” dos modelos do tipo sigmoidal expressa o valor máximo da variável dependente. No ajuste dos modelos, a maioria dos valores do parâmetro “*a*” foi similar à produtividade de biomassa seca no estágio final de cada safra da cultura. Nos modelos Streibig (1988), Gompertz e Philos (1825), Bertalanffy (1957) e Garcia e Garcia (2002), houve variação do parâmetro “*a*” na safra “Ponta Grossa 08”. O fato deveu-se a pouca variação do acúmulo de biomassa seca entre os estádios emborrachamento e pleno florescimento, e ao aumento significativo entre os estádios de pleno florescimento e maturação fisiológica (TABELA 3.3). O modelo Ratkowsky (1983) foi o que apresentou os melhores ajustes, com exceção da safra “Ponta Grossa 07”, na variável precipitação acumulada (*P*). Teve-se que condicionar restrição de limite máximo do parâmetro, pois os valores se tornavam muito altos e inconsistentes. Além disso, muitas safras do modelo Brody, (1945) também tiveram restrição do limite máximo devido o fato dos valores se tornarem muito altos (TABELA 3.4). Os valores escolhidos para limitação foram baseados na produtividade final de biomassa seca no final do ciclo de cada safra.

Os valores do parâmetro “*b*” entre as safras foram bastante variáveis (TABELA 3.4). No modelo Streibig. (1988), para a mesma variável entre as safras verificou-se valores bem próximos, com exceção da precipitação cumulada (*P*), em que o valor variou de -3,18 a -32,79. Pouca variação tiveram os modelos Brody, (1945), Bertalanffy, (1957) e Garcia e Garcia (2002), sendo entre “1,01 e 1,92”, “0,65 e 9,53” e “1,30 e 11,93”, respectivamente. Os modelos Gompertz e Philos (1825) e Ratkowsky,(1983) tiveram alta variação, entre “6,24 e 184,75” e “50,00 e 32127,15”.

O parâmetro “*c*” do modelo Streibig. (1988) variou entre as variáveis, mas não variou entre as safras (TABELA 3.4). Em todos os outros modelos, os valores ficaram bem próximos entre as safras e variáveis.

TABELA 3.4 – CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SEIS MODELOS PARA ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE DE BIOMASSA SECA NO ESTÁDIO FINAL DE QUATRO SAFRAS DA CULTURA DO TRIGO, NA REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, TENDO COMO VARIÁVEIS DE ENTRADA: DIAS APÓS O PLANTIO (DAP); GRAUS DIAS ACUMULADO (GDA); RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE ACUMULADA (Rs); E, PRECIPITAÇÃO ACUMULADA (P).

| Safrá | Modelo logístico não linear (Streibig, 1988) | | | | Modelo não linear (Gomperitz e Philus 1925) | | | | Modelo não linear (Ratkowsky, 1983) | | | | Modelo não linear (Body, 1945) | | | | Modelo não linear (Bertalanffy, 1957) | | | | Modelo sigmoidal (Garcia e Garcia 2002) | | | |
|---|--|------------|------------------|-------------------------|---|----------------------|------------------|-------------------------|-------------------------------------|-----------------------|------------------|-------------------------|--------------------------------|------------|------------------|-------------------------|---------------------------------------|------------|------------------|-------------------------|---|------------|------------------|-------------------------|
| | a (kg ha ⁻¹) | b (ad.) | c ⁽⁶⁾ | R ² (ad.) | a (kg ha ⁻¹) | b (ad.) | c ⁽⁶⁾ | R ² (ad.) | a (kg ha ⁻¹) | b (ad.) | c ⁽⁶⁾ | R ² (ad.) | a (kg ha ⁻¹) | b (ad.) | c ⁽⁶⁾ | R ² (ad.) | a (kg ha ⁻¹) | b (ad.) | c ⁽⁶⁾ | R ² (ad.) | a (kg ha ⁻¹) | b (ad.) | c ⁽⁶⁾ | R ² (ad.) |
| Dias após o plantio (DAP) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| C-07 ⁽¹⁾ | 7897,50 | -4,13 | 80,10 | 1,00 | 7717,04 | 13,41 | 0,04 | 1,00 | 7311,99 | 140,62 | 0,06 | 1,00 | 13030,62 | 1,26 | 0,01 | 0,99 | 7813,46 | 2,89 | 0,03 | 1,00 | 7420,05 | 1,64 | 131,11 | 1,00 |
| P-07 ⁽²⁾ | 4805,55 | -7,71 | 77,79 | 1,00 | 4780,83 | 184,75 | 0,07 | 1,00 | 4764,82 | 2294,78 | 0,10 | 1,00 | 8349,87 | 1,42 | 0,01 | 0,93 | 5008,32 | 8,18 | 0,05 | 0,99 | 5834,69 | 3,13 | 118,67 | 1,00 |
| C-08a ⁽¹⁾ | 10615,14 | -6,00 | 92,15 | 1,00 | 10582,67 | 47,71 | 0,05 | 1,00 | 10132,86 | 612,46 | 0,07 | 1,00 | 9768,03 | 1,43 | 0,01 | 0,80 | 14417,73 | 1,78 | 0,02 | 0,99 | 9979,74 | 2,83 | 131,99 | 1,00 |
| C-08b ⁽¹⁾ | 9011,73 | -7,14 | 84,03 | 1,00 | 8951,91 | 138,61 | 0,06 | 1,00 | 8864,90 | 1128,65 | 0,08 | 1,00 | 25898,98 | 1,15 | 0,00 | 0,98 | 9746,89 | 4,22 | 0,03 | 0,99 | 9761,63 | 2,87 | 124,77 | 1,00 |
| P-08 ⁽²⁾ | 51717,36 | -2,54 | 277,71 | 0,99 | 26147,77 | 6,69 | 0,01 | 0,99 | 11850,18 | 89,21 | 0,04 | 0,99 | 15000,00 ⁽³⁾ | 1,32 | 0,01 | 0,93 | 45148,83 | 1,02 | 0,01 | 0,99 | 10000,00 ⁽³⁾ | 1,54 | 192,78 | 0,99 |
| Média ⁽⁴⁾ | 23410,00 | -4,22 | 149,99 | — | 14815,89 | 22,60 | 0,03 | — | 9765,01 | 280,76 | 0,06 | — | 12599,55 | 1,34 | 0,01 | — | 22460,01 | 1,90 | 0,02 | — | 9133,26 | 2,00 | 151,96 | — |
| Graus dias acumulado (GDA) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| C-07 ⁽¹⁾ | 7537,02 | -4,31 | 820,27 | 1,00 | 7401,13 | 15,19 | 0,00 | 1,00 | 7207,30 | 148,56 | 0,01 | 0,99 | 9131,18 | 1,57 | 0,00 | 0,99 | 7594,42 | 2,35 | 0,00 | 1,00 | 8009,38 | 1,60 | 1442,80 | 1,00 |
| P-07 ⁽²⁾ | 4794,59 | -6,34 | 780,65 | 1,00 | 4775,25 | 63,21 | 0,01 | 1,00 | 4749,88 | 738,23 | 0,01 | 1,00 | 5707,73 | 1,92 | 0,00 | 0,95 | 4804,74 | 9,53 | 0,00 | 1,00 | 5834,69 | 3,13 | 118,67 | 1,00 |
| C-08a ⁽¹⁾ | 10891,06 | -5,11 | 887,99 | 1,00 | 10760,57 | 26,87 | 0,00 | 1,00 | 10218,11 | 272,76 | 0,01 | 1,00 | 9838,51 | 1,47 | 0,00 | 0,83 | 9888,51 | 1,47 | 0,00 | 0,99 | 9867,13 | 2,31 | 1310,25 | 1,00 |
| C-08b ⁽¹⁾ | 9002,87 | -6,38 | 817,67 | 1,00 | 8923,73 | 78,83 | 0,01 | 1,00 | 8847,86 | 538,68 | 0,01 | 1,00 | 20316,28 | 1,16 | 0,00 | 0,98 | 9575,81 | 3,37 | 0,00 | 0,99 | 9883,86 | 2,39 | 1275,88 | 1,00 |
| P-08 ⁽²⁾ | 67420,59 | -2,34 | 3700,73 | 0,99 | 29135,04 | 6,24 | 0,00 | 0,99 | 11455,97 | 73,56 | 0,00 | 0,99 | 15000,00 ⁽³⁾ | 1,28 | 0,00 | 0,94 | 43418,80 | 1,00 | 0,00 | 0,99 | 10000,00 ⁽³⁾ | 1,42 | 2165,45 | 0,99 |
| Média ⁽⁴⁾ | 28616,22 | -3,92 | 1803,00 | — | 15765,58 | 16,10 | 0,00 | — | 9627,13 | 164,96 | 0,01 | — | 11323,23 | 1,44 | 0,00 | — | 20283,91 | 1,61 | 0,00 | — | 9292,17 | 1,78 | 1639,50 | — |
| Radiação solar incidente acumulada (Rs) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| C-07 ⁽¹⁾ | 7792,02 | -4,03 | 1128,42 | 1,00 | 7592,80 | 12,89 | 0,00 | 1,00 | 7266,75 | 124,58 | 0,00 | 1,00 | 10950,14 | 1,35 | 0,00 | 0,99 | 7917,55 | 2,00 | 0,00 | 1,00 | 7532,74 | 1,56 | 1906,09 | 1,00 |
| P-07 ⁽²⁾ | 4819,30 | -6,21 | 1090,17 | 1,00 | 4795,04 | 57,11 | 0,00 | 1,00 | 4754,73 | 669,22 | 0,01 | 1,00 | 6107,46 | 1,78 | 0,00 | 0,95 | 4830,28 | 8,92 | 0,00 | 1,00 | 5950,95 | 2,37 | 1812,29 | 1,00 |
| C-08a ⁽¹⁾ | 10708,27 | -4,79 | 998,49 | 1,00 | 10518,99 | 22,04 | 0,00 | 1,00 | 10096,53 | 187,63 | 0,01 | 1,00 | 10000,00 ⁽³⁾ | 1,28 | 0,00 | 0,86 | 12460,56 | 1,73 | 0,00 | 0,99 | 9983,42 | 2,04 | 1537,56 | 1,00 |
| C-08b ⁽¹⁾ | 9035,90 | -5,86 | 967,39 | 1,00 | 8929,75 | 55,68 | 0,00 | 1,00 | 8840,82 | 378,25 | 0,01 | 1,00 | 16829,23 | 1,21 | 0,00 | 0,98 | 9411,59 | 3,53 | 0,00 | 1,00 | 9839,61 | 2,16 | 1548,36 | 1,00 |
| P-08 ⁽²⁾ | 14909,05 | -2,62 | 1974,13 | 1,00 | 11266,52 | 6,74 | 0,00 | 1,00 | 7744,63 | 81,63 | 0,00 | 0,99 | 15000,00 ⁽³⁾ | 1,26 | 0,00 | 0,97 | 16884,70 | 1,06 | 0,00 | 1,00 | 8508,46 | 1,30 | 2499,38 | 1,00 |
| Média ⁽⁴⁾ | 11136,45 | -3,81 | 1367,01 | — | 9792,77 | 13,89 | 0,00 | — | 8369,30 | 131,28 | 0,00 | — | 11983,38 | 1,30 | 0,00 | — | 12420,94 | 1,60 | 0,00 | — | 8674,87 | 1,63 | 1981,01 | — |
| Precipitação acumulada (P) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| C-07 ⁽¹⁾ | 7307,85 | -10,61 | 142,91 | 1,00 | 7319,49 | 1301,16 | 0,05 | 1,00 | 7260,08 | 32127,15 | 0,07 | 1,00 | 10000,00 ⁽³⁾ | 1,02 | 0,00 | 0,88 | 15336,65 | 1,03 | 0,01 | 0,97 | 8525,06 | 4,89 | 194,09 | 1,00 |
| P-07 ⁽²⁾ | 15719,27 | -3,18 | 243,18 | 0,77 | 45947,63 | 6,61 | 0,01 | 0,77 | 15000,00 ⁽³⁾ | 83,48 | 0,02 | 0,77 | 15000,00 ⁽³⁾ | 1,01 | 0,00 | 0,64 | 15000,00 ⁽³⁾ | 1,20 | 0,01 | 0,76 | 6421,40 | 2,04 | 246,62 | 0,77 |
| C-08a ⁽¹⁾ | 11562,98 | -3,98 | 336,17 | 1,00 | 11203,38 | 12,89 | 0,01 | 1,00 | 10328,77 | 116,56 | 0,01 | 1,00 | 10000,00 ⁽³⁾ | 1,46 | 0,00 | 0,89 | 12059,25 | 2,02 | 0,01 | 1,00 | 9786,88 | 1,73 | 514,84 | 1,00 |
| C-08b ⁽¹⁾ | 8776,95 | -32,79 | 299,90 | 1,00 | 9091,12 | 50,00 ⁽³⁾ | 0,01 | 0,95 | 9264,40 | 50,00 ⁽³⁾ | 0,01 | 0,94 | 15000,00 ⁽³⁾ | 1,14 | 0,00 | 0,92 | 10222,32 | 1,90 | 0,01 | 0,94 | 15000,00 ⁽³⁾ | 4,94 | 431,73 | 0,97 |
| P-08 ⁽²⁾ | 15000,00 ⁽³⁾ | -14,13 | 397,70 | 0,94 | 47268,67 | 153,55 | 0,01 | 0,94 | 6629,40 | 100,00 ⁽³⁾ | 0,01 | 0,73 | 14685,07 | 1,31 | 0,00 | 0,73 | 13165,74 | 0,65 | 0,00 | 0,75 | 15301,79 | 11,93 | 469,92 | 0,94 |
| Média ⁽⁴⁾ | 11290,28 | -9,57 | 292,26 | — | 21930,51 | 489,20 | 0,02 | — | 8072,75 | 10781,24 | 0,03 | — | 11561,69 | 1,26 | 0,00 | — | 13520,55 | 1,23 | 0,01 | — | 11204,58 | 6,18 | 392,95 | — |

⁽¹⁾ Safras obtidas em Castro; ⁽²⁾ Safras obtidas em Ponta Grossa; ⁽³⁾ Valores condicionados a restrição de limite máximo na calibração; ⁽⁴⁾ Médias obtidas nas safras de calibração: “Castro 2007”, “Castro 2018”, “Castro 2008a” e “Ponta Grossa 2018”; ⁽⁵⁾ Mesma unidade da variável independente. FONTE: O autor (2019).

Com exceção do modelo Brody (1945), os coeficientes de determinação (R^2) obtidos nas associações das variáveis dias após plantio (*DAP*), graus dias acumulados (*GDA*) e radiação solar incidente acumulada (*Rs*) foram estreitos (TABELA 3.4). Na variável precipitação acumulada (*P*), ocorreu variação entre o menor e maior valor ($R^2 = 0,64$ a $1,00$). Acredita-se que a precipitação não é bem distribuída ao longo do ciclo das culturas, ocorrendo períodos de seca, dificultando o ajuste dos modelos. Durante o ciclo das safras avaliadas, houve deficiência hídrica por longos períodos de tempo. O intervalo máximo sem ocorrência de precipitação foi de 38 dias na safra “Ponta Grossa 07”.

A cultivar Avante (ciclo médio) apresentou ciclo de 123 dias. Entre as safras analisadas, o menor ciclo ocorreu com 130 dias após o plantio (“Ponta Grossa 08”). Logo, todas as safras atingiram as características técnicas da cultivar. A variável graus dias acumulados (*GDA*) indicou que a necessidade térmica para a maturação do trigo foi atingida. Pedro Júnior et al. (2004) consideram que nos Estados Unidos são necessários 1130 °C graus dia para o trigo completar o ciclo. No sul do Brasil, foi encontrado necessidade de 1117 °C graus dia para a cultura atingir a maturação fisiológica (Rodrigues et al., 2001). Nas cinco safras analisadas, obteve-se 1360,20 °C como o menor valor de *GDA*, não sendo um fator limitante a cultura. Para a cultura do trigo, são necessários entre 450 a 600 mm de chuva (Doorenbos & Kassam, 1979). Apenas duas safras tiveram a precipitação acumulada nesse intervalo, além de terem sido as duas safras com maior produtividade final de biomassa seca (TABELA 3.3). A precipitação foi o fator climático que mais influenciou na produção dos cultivos, devido à alternância e volume das precipitações.

3.5.2.2 Calibração dos modelos para a cultura da cevada

O resultado da calibração dos modelos testados para os dias após o plantio (*DAP*), graus dias acumulado (*GDA*), radiação solar incidente acumulada (*Rs*) e precipitação acumulada (*P*) para a cultura da cevada encontram-se na Tabela 3.5 e Apêndice 4.

O parâmetro “*a*” dos modelos sigmoidal expressam à amplitude máxima da variável dependente. Contudo, nem todos os valores ficaram próximos a produtividade final da biomassa seca da cultura. No modelo Streibig (1988), houve diferença na safra “Ponta Grossa 07” em todas as variáveis, e na safra “Ponta Grossa 08a”, na variável precipitação acumulada (*P*). Nos modelos Gompertz e Philos (1825), Ratkowsky (1983) e Bertalanffy (1957) ocorreram as mesmas características na safra “Ponta Grossa 07”. No modelo Brody (1945), teve-se a necessidade de condicionar a restrição de limite máximo de muitas safras, pois os valores da calibração sem a restrição se tornavam altos.

As variações do parâmetro “*b*” do modelo Streibig (1988) aconteceram entre variáveis, e não entre safras. Porém, os modelos Gompertz e Philos (1825) e Ratkowsky (1983) tiveram altas variações entre variáveis e safras. Os valores variaram entre “5,45 e 86946,75” e “37,44 e 35076,11”, respectivamente. Nos modelos Brody (1945), Bertalanffy (1957) e Garcia e Garcia (2002), os valores do parâmetro “*b*” ficaram baixos, porém foram próximos entre variáveis e safras.

A variação dos valores do parâmetro “*c*” no modelo Garcia e Garcia (2002) ocorreu entre variáveis, mas não entre as safras. Observou-se valores baixos nos modelos Gompertz e Philos (1825), Ratkowsky (1983), Brody (1945) e Bertalanffy (1957). Contudo, os modelos apresentaram sensibilidade ao parâmetro, pois pequenas variações no valor “*c*” alteram significativamente a curva sigmoidal.

As variáveis dias após plantio (*DAP*), graus dias acumulados (*GDA*) e radiação solar incidente acumulada (*Rs*) apresentaram valores do coeficiente de determinação (R^2) maiores que 0,9 (TABELA 3.5). Os valores mais baixos foram observados para precipitação acumulada (*P*; $R^2 = 0,67$), no modelo Brody (1945). Alguns parâmetros tiveram restrição do limite máximo, pois no ajuste os valores ficavam altos e inconsistentes.

A cultivar BRS 195 possui ciclo curto, com 135 dias para a região Sul, e todas as safras em estudo superaram esse período. O menor ciclo ocorreu com 138 dias (safra “Ponta Grossa 07”), enquanto o maior ciclo ocorreu com 161 dias (safra “Castro 08b”). Vários pesquisadores correlacionaram o ciclo das culturas com variáveis ambientais, como o acúmulo de energia obtido no intervalo ideal de temperatura determinado para cada cultura (graus dias). Amabile et al. (2009)

comparando vários genótipos da cultura da cevada, verificaram que a cultivar BRS 195 apresentou a maior média dos valores de graus dia da emergência ao espigamento (1393,3°C). EMBRAPA (1999) verificaram que a necessidade de 1600 °C para a cultivar BRS 180 atingir a maturação fisiológica. No presente estudo, analisando seis safras de cevada, obteve-se 2239,25 °C como o menor valor de graus dias acumulados, não sendo um fator limitante a cultura. A radiação solar disponível controla a produção de biomassa seca das plantas, desde que os níveis de nutrientes e o suprimento de água estejam adequados (Monteith, 1965). A quantidade de radiação solar interceptada e absorvida pelas folhas, e sua eficiência na conversão de energia pela fotossíntese, relacionam a produção de biomassa das culturas (Heinemann et al., 2006). Para a calibração no presente trabalho, a radiação solar acumulada não foi um fator limitante.

2.5.3 Validação dos modelos testados

Com os valores dos parâmetros obtidos na calibração para cada modelo e variável, procedeu-se a análise de validação. Para tal, foram utilizadas as safras que não foram utilizadas no processo de calibração. Mesmo com bons ajustes na calibração e bons valores do coeficiente de determinação (R^2), observou-se que algumas safras apresentaram erros absolutos e relativos muito altos.

2.5.3.1 Validação dos modelos para a cultura do trigo

Apenas os modelos Ratkowsky (1983) e Garcia e Garcia (2002) tiveram erro absoluto (Ea) menor que 1000 kg ha⁻¹ (TABELA 3.6) para a variável dias após plantio (DAP). Os demais modelos tiveram erros entre 1108,23 e 5652,06 kg ha⁻¹. A safra “Ponta Grossa 07” teve déficit hídrico durante o ciclo. Foram contabilizados apenas 5,6 mm de precipitação pluviométrica nos primeiros 41 dias após o plantio. Os elevados erros observados na validação deveram-se provavelmente à problemas relacionados com a falta de chuvas durante o ciclo. Não foi identificado nenhum modelo com desempenho ótimo na validação das safras. A variável que mais se destacou foi a radiação solar incidente acumulada (Rs), tendo desempenhos “Bom”.

No ajuste individual os modelos Brody (1945) e Bertalanffy (1957) tiveram valores negativos de biomassa seca no início do ciclo da cultura com todas as

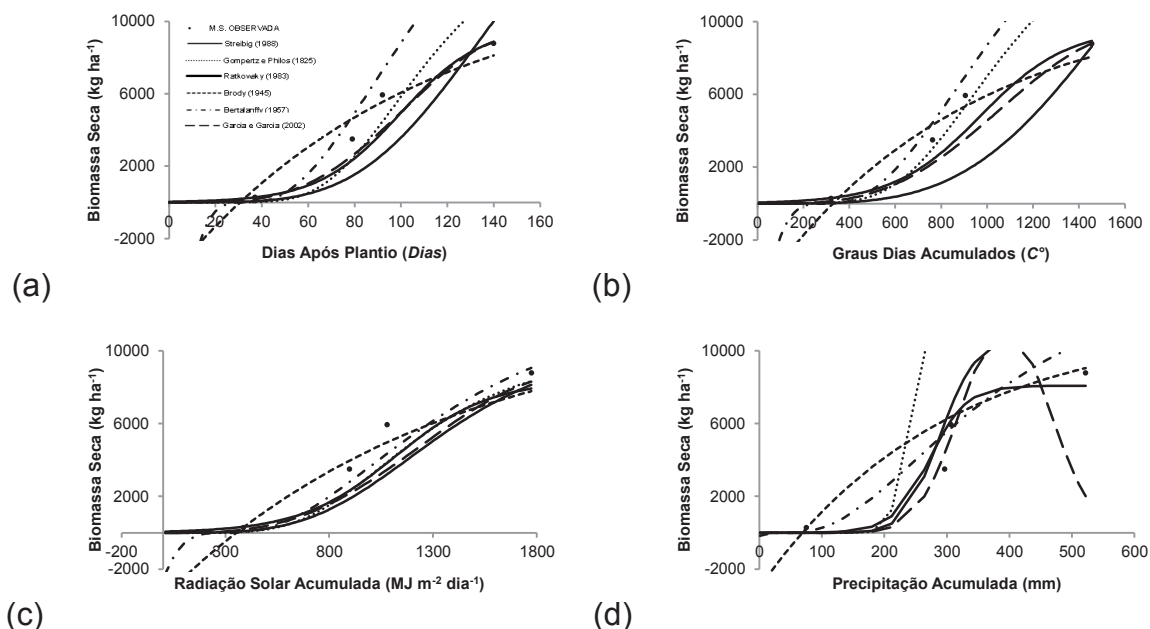
variáveis (FIGURAS 3.1 e 3.2), indicando restrição para serem utilizados em determinados intervalos.

TABELA 3.6. ERROS ABSOLUTO (Ea) E RELATIVO (Er), COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO (r), ÍNDICES “ d ” DE WILLMOTT et al. (1982), “ c ” DE CAMARGO E SENTELHAS (1997) E DESEMPENHO, ENTRE A BIOMASSA SECA OBSERVADA E ESTIMADA NOS QUATRO ESTÁDIOS FENOLÓGICOS, PARA A CULTURA DO TRIGO, NAS SAFRAS “CASTRO 2008b” E “PONTA GROSSA 2007”, E MODELOS ANALISADOS.

| Modelo | Ea (kg ha ⁻¹) | Er (%) | R | “ d ” ----- (adimensional) ----- | “ c ” | Desempenho |
|--------------------------|--------------------------------|-------------|------|---------------------------------------|---------|------------|
| ----- DAP ----- | | | | | | |
| Streibig (1988) | 1692,4 | 50,1 | 0,80 | 0,87 | 0,70 | Bom |
| Gompertz e Philos (1825) | 1592,4 | 36,9 | 0,85 | 0,86 | 0,73 | Bom |
| Ratkowsky (1983) | 968,6 | 26,5 | 0,86 | 0,92 | 0,79 | Muito Bom |
| Brody (1945) | 1386,1 | 29,8 | 0,89 | 0,90 | 0,80 | Muito Bom |
| Bertalanffy (1957) | 3033,7 | 47,1 | 0,88 | 0,73 | 0,64 | Mediano |
| Garcia e Garcia (2002) | 948,2 | 25,5 | 0,87 | 0,92 | 0,80 | Muito Bom |
| ----- GDA ----- | | | | | | |
| Streibig (1988) | 2067,1 | 64,4 | 0,68 | 0,78 | 0,53 | Sofrível |
| Gompertz e Philos (1825) | 2149,9 | 40,4 | 0,82 | 0,78 | 0,64 | Mediano |
| Ratkowsky (1983) | 1131,0 | 28,9 | 0,84 | 0,90 | 0,76 | Bom |
| Brody (1945) | 1442,7 | 31,7 | 0,85 | 0,89 | 0,76 | Bom |
| Bertalanffy (1957) | 3259,6 | 48,6 | 0,83 | 0,68 | 0,57 | Sofrível |
| Garcia e Garcia (2002) | 1108,2 | 30,1 | 0,83 | 0,90 | 0,74 | Bom |
| ----- Rs ----- | | | | | | |
| Streibig (1988) | 1535,5 | 40,9 | 0,77 | 0,86 | 0,66 | Bom |
| Gompertz e Philos (1825) | 1488,3 | 37,0 | 0,80 | 0,88 | 0,70 | Bom |
| Ratkowsky (1983) | 1446,8 | 36,8 | 0,81 | 0,89 | 0,72 | Bom |
| Brody (1945) | 1682,4 | 35,7 | 0,79 | 0,84 | 0,67 | Bom |
| Bertalanffy (1957) | 1648,9 | 36,4 | 0,79 | 0,84 | 0,67 | Bom |
| Garcia e Garcia (2002) | 1384,9 | 36,4 | 0,82 | 0,90 | 0,73 | Bom |
| ----- P ----- | | | | | | |
| Streibig (1988) | 1975,4 | 64,9 | 0,83 | 0,87 | 0,72 | Bom |
| Gompertz e Philos (1825) | 5652,1 | 84,3 | 0,79 | 0,58 | 0,46 | Mau |
| Ratkowsky (1983) | 1555,5 | 60,9 | 0,80 | 0,87 | 0,70 | Bom |
| Brody (1945) | 1236,3 | 35,6 | 0,89 | 0,93 | 0,83 | Muito Bom |
| Bertalanffy (1957) | 1247,7 | 39,0 | 0,90 | 0,93 | 0,83 | Muito Bom |
| Garcia e Garcia (2002) | 2268,2 | 154,4 | 0,51 | 0,63 | 0,32 | Péssimo |

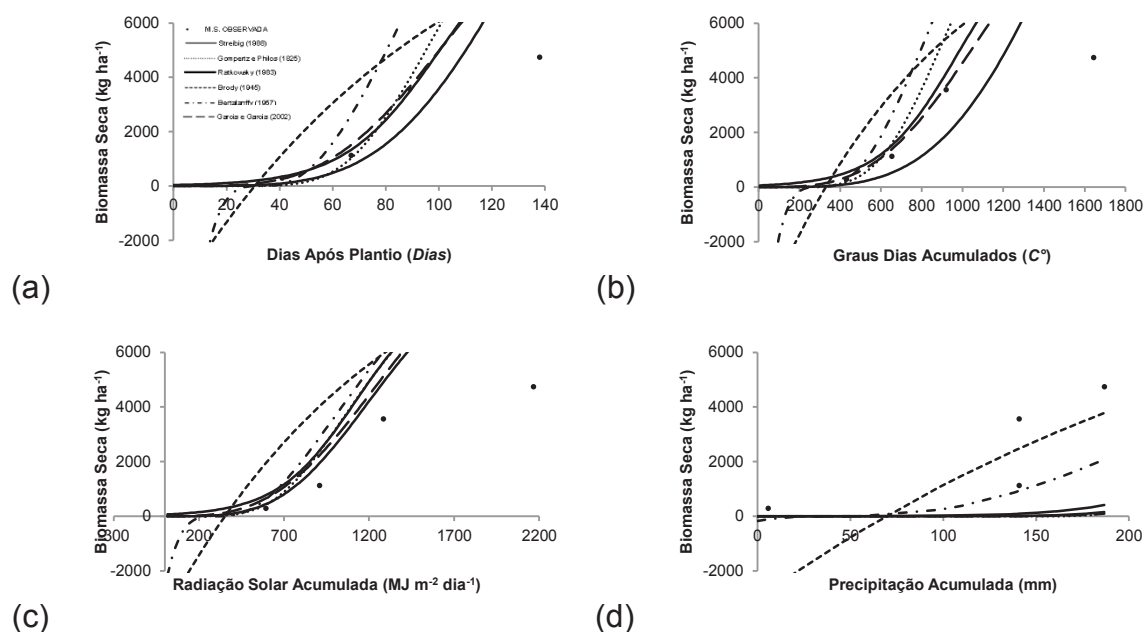
FONTE: O autor (2019)

FIGURA 3.1 – PRODUTIVIDADE DE BIOMASSA SECA PARA O TRIGO, OBSERVADA (SAFRA “CASTRO 2008b”) E ESTIMADA COM SEIS MODELOS, EMPREGANDO A MÉDIA DOS PARÂMETROS “a”, “b” E “c” OBTIDOS NO PROCESSO DE CALIBRAÇÃO NA REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, PARA AS VARIÁVEIS DE ENTRADA: a) DIAS APÓS O PLANTIO (DAP); b) GRAUS DIAS ACUMULADO (GDA); c) RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE ACUMULADA (Rs); E, d) PRECIPITAÇÃO ACUMULADA (P).



FONTE: O autor (2019).

FIGURA 3.2 – PRODUTIVIDADE DE BIOMASSA SECA PARA O TRIGO, OBSERVADA (SAFRA “PONTA GROSSA 2007”) E ESTIMADA COM SEIS MODELOS, EMPREGANDO A MÉDIA DOS PARÂMETROS “a”, “b” E “c” OBTIDOS NO PROCESSO DE CALIBRAÇÃO NA REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, PARA AS VARIÁVEIS DE ENTRADA: a) DIAS APÓS O PLANTIO (DAP); b) GRAUS DIAS ACUMULADO (GDA); c) RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE ACUMULADA (Rs); E, d) PRECIPITAÇÃO ACUMULADA (P).



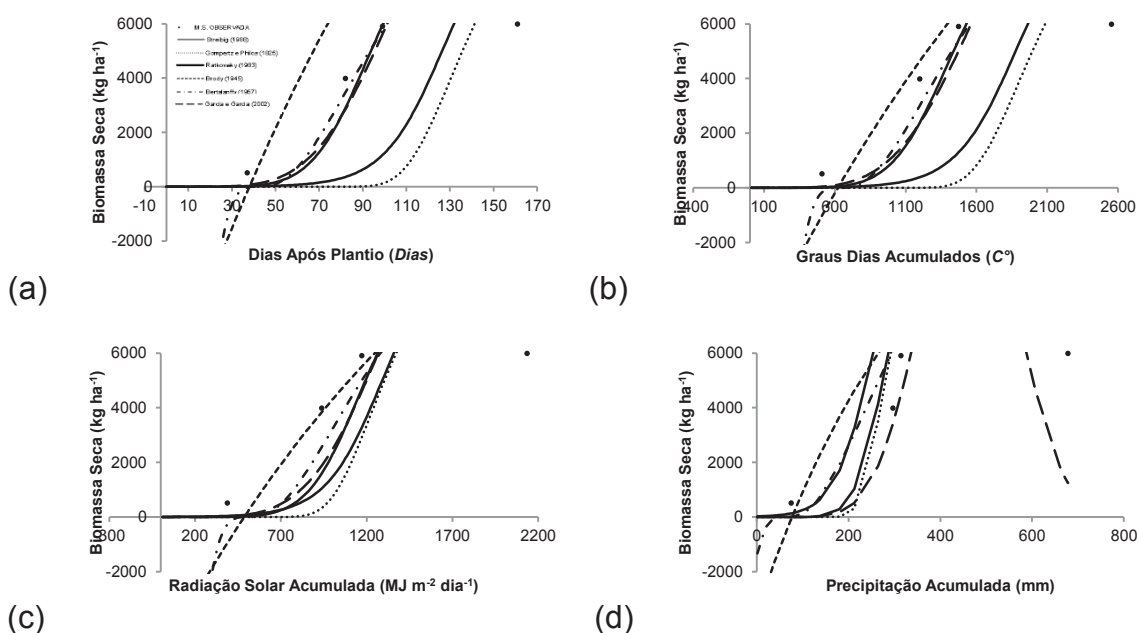
FONTE: O autor (2019).

2.5.3.2 Validação dos modelos para a cultura da cevada

Todos os modelos e variáveis analisadas apresentaram erros absolutos (Ea) acima de 1000 kg ha^{-1} (FIGURAS 3.3 a 3.5 e TABELA 3.7), com intervalo entre 1134,48 e $3863,44 \text{ kg ha}^{-1}$. O pior desempenho foi observado no modelo Gompertz e Philos (1825), para a variável dias após plantio (DAP ; “mau”). Contudo, para a mesma variável, o modelo Garcia e Garcia (2002) apresentou desempenho satisfatório (“ótimo”), e para a variável graus dias acumulados (GDA) proporcionou o melhor desempenho entre todas as variáveis (“ótimo”). Os melhores desempenhos foram observados para a variável radiação solar incidente acumulada (Rs), em que os quatro modelos tiveram desempenho “Bom” e “Muito Bom”. A variável precipitação acumulada (P) proporcionou desempenhos predominantemente “Mediano” com os modelos.

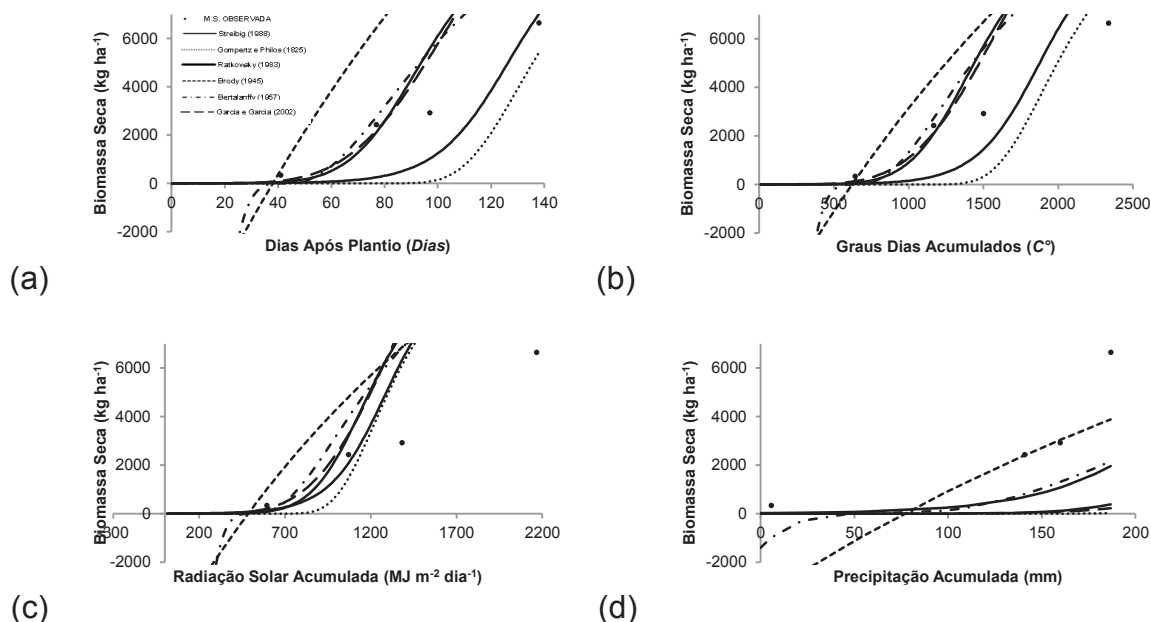
No ajuste individual, assim como verificado para o trigo, os modelos Brody (1945) e Bertalanffy (1957) também tiveram valores negativos de biomassa seca no início do ciclo da cultura com todas as variáveis (FIGURAS 3.3 a 3.5), indicando restrição para serem utilizados em determinados intervalos.

FIGURA 3.3 – PRODUTIVIDADE DE BIOMASSA SECA PARA A CEVADA, OBSERVADA (SAFRA “CASTRO 08b”) E ESTIMADA COM SEIS MODELOS, EMPREGANDO A MÉDIA DOS PARÂMETROS “a”, “b” E “c” OBTIDOS NO PROCESSO DE CALIBRAÇÃO NA REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, PARA AS VARIÁVEIS DE ENTRADA: a) DIAS APÓS O PLANTIO (DAP); b) GRAUS DIAS ACUMULADO (GDA); c) RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE ACUMULADA (Rs); E, d) PRECIPITAÇÃO ACUMULADA (P).



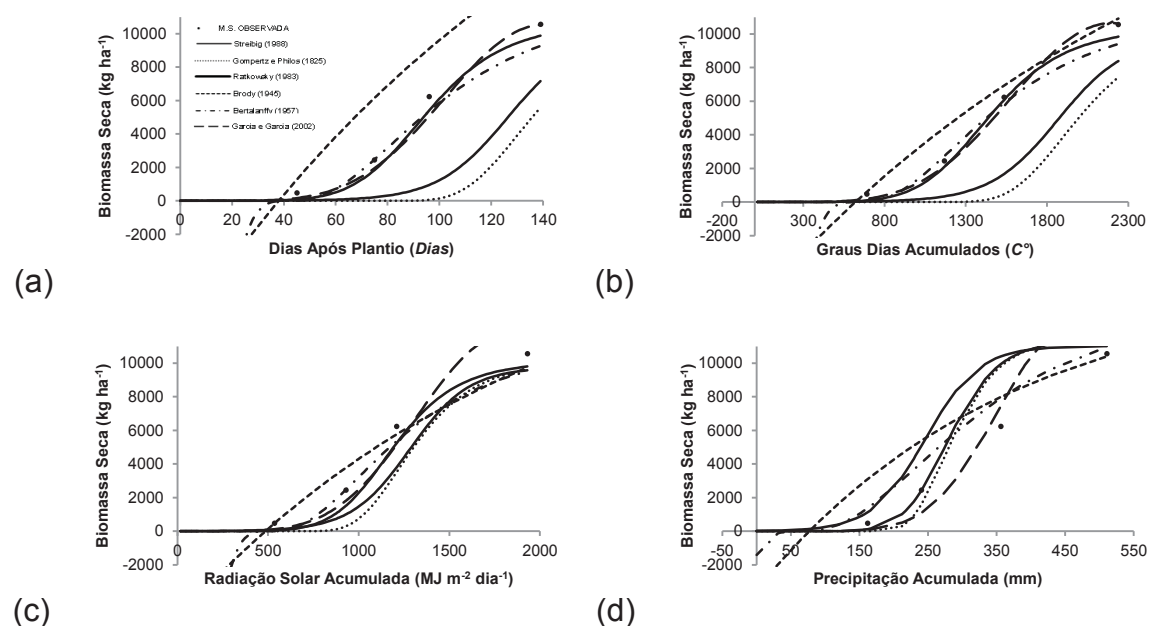
FONTE: O autor (2019).

FIGURA 3.4 – PRODUTIVIDADE DE BIOMASSA SECA PARA A CEVADA, OBSERVADA (SAFRA “PONTA GROSSA 07”) E ESTIMADA COM SEIS MODELOS, EMPREGANDO A MÉDIA DOS PARÂMETROS “a”, “b” E “c” OBTIDOS NO PROCESSO DE CALIBRAÇÃO NA REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, PARA AS VARIÁVEIS DE ENTRADA: a) DIAS APÓS O PLANTIO (DAP); b) GRAUS DIAS ACUMULADO (GDA); c) RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE ACUMULADA (Rs); E, d) PRECIPITAÇÃO ACUMULADA (P).



FONTE: O autor (2019).

FIGURA 3.5 – PRODUTIVIDADE DE BIOMASSA SECA PARA A CEVADA, OBSERVADA (SAFRA “PONTA GROSSA 08b”) E ESTIMADA COM SEIS MODELOS, EMPREGANDO A MÉDIA DOS PARÂMETROS “a”, “b” E “c” OBTIDOS NO PROCESSO DE CALIBRAÇÃO NA REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, PARA AS VARIÁVEIS DE ENTRADA: a) DIAS APÓS O PLANTIO (DAP); b) GRAUS DIAS ACUMULADO (GDA); c) RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE ACUMULADA (Rs); E, d) PRECIPITAÇÃO ACUMULADA (P).



FONTE: O autor (2019).

TABELA 3.7. ERROS ABSOLUTO (Ea) E RELATIVO (Er), COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO (r), ÍNDICES “ d ” DE WILLMOTT et al. (1982), “ c ” DE CAMARGO E SENTELHAS (1997) E DESEMPENHO, ENTRE A BIOMASSA SECA OBSERVADA E ESTIMADA NOS QUATRO ESTÁDIOS FENOLÓGICOS, PARA A CULTURA DA CEVADA, NAS SAFRAS CASTRO 2008b, PONTA GROSSA 2007 E PONTA GROSSA 2008b, E MODELOS ANALISADOS.

| Modelo | Ea (kg ha ⁻¹) | Er (%) | R ----- (adimensional) ----- | “ d ” | “ c ” | Desempenho |
|--------------------------|--------------------------------|-------------|-----------------------------------|---------|---------|------------|
| ----- DAP ----- | | | | | | |
| Streibig (1988) | 1250,7 | 27,8 | 0,89 | 0,92 | 0,82 | Muito Bom |
| Gompertz e Philos (1825) | 2817,0 | 170,5 | 0,65 | 0,70 | 0,46 | Mau |
| Ratkowsky (1983) | 2355,0 | 103,1 | 0,73 | 0,80 | 0,58 | Sufrível |
| Brody (1945) | 3863,4 | 49,6 | 0,87 | 0,72 | 0,63 | Mediano |
| Bertalanffy (1957) | 1162,2 | 25,8 | 0,89 | 0,93 | 0,83 | Muito Bom |
| Garcia e Garcia (2002) | 1134,5 | 25,5 | 0,91 | 0,94 | 0,85 | Ótimo |
| ----- GDA ----- | | | | | | |
| Streibig (1988) | 1265,9 | 28,2 | 0,89 | 0,92 | 0,82 | Muito Bom |
| Gompertz e Philos (1825) | 2670,3 | 124,5 | 0,70 | 0,77 | 0,54 | Sufrível |
| Ratkowsky (1983) | 2298,9 | 85,5 | 0,76 | 0,83 | 0,64 | Mediano |
| Brody (1945) | 1919,2 | 33,8 | 0,87 | 0,86 | 0,75 | Bom |
| Bertalanffy (1957) | 1368,0 | 27,7 | 0,90 | 0,92 | 0,82 | Muito Bom |
| Garcia e Garcia (2002) | 1141,9 | 25,9 | 0,91 | 0,94 | 0,85 | Ótimo |
| ----- Rs ----- | | | | | | |
| Streibig (1988) | 1671,4 | 37,4 | 0,83 | 0,89 | 0,74 | Bom |
| Gompertz e Philos (1825) | 2088,1 | 56,9 | 0,79 | 0,87 | 0,68 | Bom |
| Ratkowsky (1983) | 1830,9 | 46,9 | 0,81 | 0,88 | 0,71 | Bom |
| Brody (1945) | 1698,1 | 32,8 | 0,84 | 0,88 | 0,74 | Bom |
| Bertalanffy (1957) | 1551,3 | 33,5 | 0,85 | 0,90 | 0,76 | Muito Bom |
| Garcia e Garcia (2002) | 1525,1 | 33,5 | 0,86 | 0,91 | 0,78 | Muito Bom |
| ----- P ----- | | | | | | |
| Streibig (1988) | 2304,9 | 54,5 | 0,78 | 0,84 | 0,65 | Mediano |
| Gompertz e Philos (1825) | 2366,2 | 58,4 | 0,77 | 0,83 | 0,64 | Mediano |
| Ratkowsky (1983) | 2502,5 | 49,6 | 0,77 | 0,82 | 0,63 | Mediano |
| Brody (1945) | 2052,0 | 41,8 | 0,79 | 0,85 | 0,67 | Bom |
| Bertalanffy (1957) | 1944,9 | 44,4 | 0,80 | 0,86 | 0,69 | Bom |
| Garcia e Garcia (2002) | 1895,4 | 77,9 | 0,79 | 0,84 | 0,67 | Bom |

FONTE: O autor (2019)

3.6 CONCLUSÕES

Com exceção do modelo Brody, a associação do acúmulo da biomassa seca das culturas e variáveis testadas (*DAP*, *GDA* e *RS*) foi satisfatória na calibração para o trigo ($R^2 > 0,8$) e cevada ($R^2 > 0,9$). A *P* proporcionou maior variabilidade ($R^2 > 0,64$ para o trigo e $R^2 > 0,67$ para a cevada)

Com exceção do desempenho dos modelos para a precipitação com as culturas do trigo (entre “péssimo” e “muito bom”) e cevada (entre “mediano” e “bom”), as demais variáveis apresentaram desempenho promissores entre “mau” e “ótimo”, predominantemente “bom” e “muito bom”.

A ocorrência de valores negativos de biomassa seca estimada no início das safras com os modelos Brody e Bertalanffy indicou restrição à sua utilização. Mesmo com bons ajustes na calibração para trigo e cevada, a validação indicou altos erros absolutos e relativos para todas as safras.

3.7 REFERÊNCIAS

- AGUIAR, L. M.; GUISCHEM, J. M. **Graus-dia Estimado com Diferentes Valores de Temperatura Base na Cultura do Milho (*Zea mays* L.)**. XXIV Congresso Nacional de Milho e Sorgo, Florianópolis-SC, 2002.
- AMABILE, R. F.; INÁCIO, A. A. N.; RIBEIRO JUNIOR, W. Q.; SILVA, F. A. M. da; SAYD, R. M. Graus dias para cultivares de cevada (*Hordeum vulgare* L.) irrigada no Distrito Federal. Embrapa Cerrado, Brasília, 2009 (Folders).
- ARNOLD, C. Y. The determination and significance of the base temperature in a linear heat unit system. **Proceedings of the American Society for Horticultural Science**, Alexandria, v. 74, n.1 p. 430-445, 1959.
- BERTALANFFY, L. Quantitative laws in metabolism and growth. **Quarterly Review of Biology**, v.32, n.3, p.217-230, 1957.
- BRODY, S. Bioenergetics and Growth. **Rheinhold Publishing**, New York, 1945.
- CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.
- CARVALHO, D. F.; OLIVEIRA, A. D.; PEREIRA, J. B. A. Ajuste de modelos para estimativa do índice de área foliar e acúmulo de biomassa do pimentão em função de graus-dias. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 32, n. 3, p. 971-982, 2011.
- DAVIS, K. F.; GEPHART, J. A.; EMERY, K. A.; LEACH, A. M.; GALLOWAY, J. N.; D'ODORICO, P. Meeting future food demand with current agricultural resources. **Global Environmental Change**, v. 39, p. 125-132, 2016.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos**. Roma: FAO, 1979.

EMBRAPA - Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária / Fundação ABC. **Mapa do levantamento semi-detalhado de solos**: Município de Castro. Elaborado por: FASOLO, P. J.; CARVALHO, A. P.; BOGNOLA, I. A.; POTER, R. O., 2001.

EMBRAPA - Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.

EMBRAPA CERRADOS. **CEVADA BRS 180**: primeira cultivar de cevada cervejeira para o sistema de produção irrigado do cerrado. Planaltina: Embrapa Cerrados, 1999. Folder Técnico.

FANCELLI, A.L.; DOURADO-NETO, D. Produção de milho. **Guaíba: Agropecuária**, 2000. 360p.

GARCIA E GARCIA, A. **Modelos para área foliar, fitomassa e extração de nutrientes na cultura de arroz**. Piracicaba. Tese – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 2002.

GEAR, N. Evaluación de la respuesta al fotoperíodo en cultivares de cebada cervecera. In. **Reunião Anual de Pesquisa em Cevada**, Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2005.

GOMPERTZ, B. & PHILOS, T. **Roy Soc London**. 115-513. 1825.

HEINEMANN, A. B.; STONE, L. F.; DIDONET, A. D.; TRINDADE, M. da G.; SOARES, B. B.; MOREIRA, J. A. A.; CÁNOVAS, A. D. Eficiência de uso da radiação solar na produtividade do trigo decorrente da adubação nitrogenada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, n.2, p.352-356, 2006.

HOLLINGER, F.; STAATZ, J. M. **Agricultural Growth in West Africa: Market and Policy Drivers**, FAO and African Development Bank. Rome, 2015.

JONES, J. W.; ANTLE, J. M.; BASSO, B.; BOOTE, K. J.; CONANT, R. T.; FOSTER, I.; GODFRAY, H. C. J.; HERRERO, M.; HOWITT, R. E.; JANSSEN, S.; KEATING, B. A.; CARPENA, R. M.; PORTER, C. H.; ROSENZWEIG, C.; WHEELER, T. R. Brief history of agricultural systems modeling. **Agricultural Systems**, v. 155, p. 240-254, 2017.

MONTEITH, J. L. Light distribution and photosynthesis in field crops. **Annals of Botany**, Oxford, v. 29, p. 17- 37, 1965.

OMETTO, J. C. Bioclimatologia vegetal. São Paulo: **Agronômica Ceres** 1981. 440p.

PEDRO JÚNIOR, M. J., CAMARGO, M. B. P. de, MORAES, A. V. de C., FELÍCIO, J. C., CASTRO, J. L. de. Temperatura-base, graus-dia e duração do ciclo para cultivares de triticale. **Bragantia**, Campinas, v. 63, n. 3, p. 447-453, 2004.

PEIXOTO, C. P., CÂMARA, G. M. de S., MARTINS, M. C., MARCHIORI, L. F. S., GUERZONI, R. A., MATTIAZZI, P. Épocas de semeadura e densidade de plantas de soja: I. Componentes da produção e rendimento de grãos. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 57, n. 1, p. 89-96, 2000.

RATKOWSKY, D. A. Nonlinear regression modeling: a unified practical approach. **Marcel Dekker**, New York, 1983.

RODRIGUES, O.; DIDONET, A. D.; LHAMBY, J. C. B.; ROMAN, E. S. Modelo para previsão de estádios de desenvolvimento em trigo. Embrapa Trigo – **Circular técnica online**, Passo Fundo, n. 5, 2001. Disponível em: <http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/p_ci05_4.htm>. Acesso em: 16 janeiro 2019.

SAVIN, R.; STONE, P. J.; NICOLAS, M. E.; WARLAW, I. F. Grain growth and malting quality of barley: 1-Effects of heat stress and moderately high temperature. **Australian Journal of Agricultural Research**, Collingwood, v. 48, 1997.

STREIBIG, J. C. Herbicide bioassay. **Weed Res.**, v. 28, n. 6, p. 479-484, 1988.

WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; O'DONNELL, J. & ROWE, C. M. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, v. 90, n. 5, p. 8995-9005, 1985.

YANG, X.; CHEN, F.; LIN, X.; LIU, Z.; ZHANG, H.; ZHAO, J.; LI K.; YE, Q.; LI, Y.; LV S.; YANG, P.; WU, W.; LI, Z.; LAL, R.; TANG, H. Potential benefits of climate change for crop productivity in China. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 208, n. 15, p. 76-84, 2015.

ZHOU, Y.; STAATZ, J. Projected demand and supply for various foods in West Africa: Implications for investments and food policy. **Food Policy**, v. 61, p. 198-212, 2016.

ZIMMERMANN, A.; WEBBER, H.; ZHAO, G.; EWERT, F.; KROS, J.; WOLF, J.; BRITZ, W.; VRIES, W. Climate change impacts on crop yields, land use and environment in response to crop sowing dates and thermal time requirements. **Agricultural Systems**, v. 157, p. 81-92, 2017.

4 CONCLUSÕES GERAIS

Safras que tiveram maior *GDA*, *DAP*, *Rs* e *P* para atingir o estágio de maturação fisiológica, de forma geral, não foram as que obtiveram maior produtividade final de biomassa seca.

Os parâmetros dos seis modelos testados permitem ajuste e calibração entre produtividades de biomassa seca da soja, milho, trigo e cevada, ao longo da safra com as variáveis *DAP*, *GDA*, *Rs* e *P*. Não foi possível estabelecer parâmetros únicos para os modelos, respectivos a cada cultura, no processo de ajuste e calibração.

Mesmo ajustados, o parâmetro “*a*” dos modelos testados foram similares à produtividade de biomassa seca no estágio final de cada safra das culturas testadas.

Para não apresentar resultados inconsistentes, os parâmetros “*a*”, “*b*” e “*c*” em algumas análises (11,6%) tiveram de ser condicionadas no processo de ajuste e calibração, impondo limitação, dificuldade e imprecisão.

O parâmetro “*b*” está ligado à forma das curvas dos modelos, sendo que seus valores foram maiores para maiores valores das variáveis descritoras, e mais distante a curva dos modelos ficou do eixo “*y*”. O parâmetro “*b*” teve maior variabilidade que os parâmetros “*a*” e “*c*”.

O parâmetro “*c*” influencia a escala de cada variável e os valores obtidos nos ajustes e calibração foram muito pequenos e sensíveis (“*c*” < 0,1 predominantemente). A variabilidade da precipitação pluviométrica, impondo falta ou excesso de chuva em determinados períodos das safras foi à causa que mais influenciou no ajuste dos parâmetros “*c*” dos modelos.

Os ajustes entre as variáveis testadas e a produção de biomassa seca foram bem estreitos para a maioria das safras analisadas na calibração. Contudo, os erros absolutos e relativos foram altos, mesmo tendo desempenhos das análises variando entre “péssimo” a “ótimo”, com predominância de “muito bom”. O resultado indicou para novas análises a necessidade de mais pontos de coleta de biomassa seca nos estádios.

5 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os modelos avaliados foram capazes de gerar boa estimativa de biomassa seca para as culturas da soja, milho, trigo e cevada na Região dos Campos Gerais, nos municípios de Castro e Ponta Grossa, Estado do Paraná. As estimativas nos estádios iniciais dos cultivos foram regulares, sendo melhores nos estádios finais. Devido à variabilidade dos elementos climáticos ao longo do ciclo, não foi possível identificar qual elemento tem maior influência na produtividade de biomassa seca dos cultivos.

Para estudos futuros, recomendam-se mais safras para calibração e validação dos modelos, e mais pontos de coleta durante os estádios de desenvolvimento das culturas. Pode-se também adotar coleta por sequência de dias, como semanal ou quinzenal.

O ideal no futuro será estabelecer valores padrão ou faixa de valores para cada parâmetro, em cada cultura, levando em consideração a previsão climática ou histórico de previsões para o ano de cultivo. Com isso, no desenvolvimento de *softwares* poderá ser agrupado um banco de dados, para apoio e suporte a produtores e pesquisadores, auxiliando na escolha da melhor época de plantio na região.

6 REFERÊNCIAS GERAIS

- AGUIAR, L. M.; GUISCHEM, J. M. **Graus-dia Estimado com Diferentes Valores de Temperatura Base na Cultura do Milho (*Zea mays* L.)**. XXIV Congresso Nacional de Milho e Sorgo, Florianópolis-SC, 2002.
- AMABILE, R. F.; INÁCIO, A. A. N.; RIBEIRO JUNIOR, W. Q.; SILVA, F. A. M. da; SAYD, R. M. Graus dias para cultivares de cevada (*Hordeum vulgare* L.) irrigada no Distrito Federal. Embrapa Cerrado, Brasília, 2009 (Folders).
- ARAUJO, E. C. de; URIBE-OPAZO, M. A.; JOHANN, J. A. Modelo de regressão espacial para estimativa da produtividade da soja associada a variáveis agrometeorológicas na região oeste do estado do Paraná. **Engenharia Agrícola, Jaboticabal**, v. 34, n. 2, p. 286-299, 2014.
- ARNOLD, C. Y. The determination and significance of the base temperature in a linear heat unit system. **Proceedings of the American Society for Horticultural Science**, Alexandria, v. 74, n.1 p. 430-445, 1959.
- BERLATO, M. A.; FONTANA, D. C.; GONÇALVES, H. M. Relação entre rendimento de grãos de soja e variáveis meteorológicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 27, n. 5, p. 695-702, 1992.
- BERTALANFFY, L. Quantitative laws in metabolism and growth. **Quarterly Review of Biology**, v. 32, n. 3, p. 217-230, 1957.
- BOJANIC, A. **7 anos da visão 2050**. Trabalho apresentado no Diálogo: Desafio 2050 e Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, São Paulo, 2017.
- BORGES, V. P.; OLIVEIRA, A. S. de; FILHO, M. A. C.; SILVA, T. S. M. da; PAMPONET, B. M. Avaliação de modelos de estimativa da radiação solar incidente em Cruz das Almas, Bahia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 1, p. 74-80, 2010.
- BRODY, S. Bioenergetics and Growth. **Rheinhold Publishing**, New York, 1945.
- CALDARELLI, C. E.; BACCHI, M. R. P. Fatores de influência no preço do milho no Brasil. **Nova Economia**, Belo Horizonte, v. 22, n. 1, p. 141-164, 2012.
- CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.
- CAMPOS, C. G. C.; MALINOVSKI, L. I.; VIEIRA, H. J.; SILVA, A. L. D. Global solar radiation interception by grapevines trained to a vertical trellis system. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 38, n. 3, e-689. Epub August 11, 2016.
- CAMPOS, L. H. F.; MELLO, M. S. C.; CARVALHO, S. J. P.; NICOLAI, M.; CHRISTOFFOLETI, P. J. Crescimento inicial de *Merremia cissoides*, *Neonotonia wightii* e *Stizolobium aterrimum*. **Planta Daninha**, v. 30, n. 3, p. 497-504, 2012.

CARON, B. O.; SCHMIDT, D.; BALBINOT, R.; BEHLING, A.; ELOY, E.; ELLI, E. F. Efficiency of the use of yerba mate solar radiation in intercropping or monocropping for the accumulation of carbon. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 40, n. 6, p. 983-990, 2016.

CARVALHO, D. F.; OLIVEIRA, A. D.; PEREIRA, J. B. A. Ajuste de modelos para estimativa do índice de área foliar e acúmulo de biomassa do pimentão em função de graus-dias. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 32, n. 3, p. 971-982, 2011.

CHUKWUJINDU, N. S. A comprehensive review of empirical models for estimating global solar radiation in Africa. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 78, p. 955-995, 2017.

CONFALONIERI, R. Combinando um gerador de clima e um método de análise de sensibilidade padrão para quantificar a relevância das variáveis climáticas e saídas dos modelos agrometeorológicos. **Climatologia teórica e aplicada**, v. 108, n. 1-2, p. 19-30, 2012.

COSTA, J. A.; MARCHEZAN, E. **Características dos estádios de desenvolvimento da soja**. Campinas, Fundação Cargill. 1982. 30p.

COSTA, J. R. da; PINHO, J. L. N. de; PARRY, Ma. M. Produção de matéria seca de cultivares de milho sob diferentes níveis de estresse hídrico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 5, p. 443-450, 2008.

DALLACORT, R.; DE FREITAS, P. S. L.; DE FARIA, R. T.; GONÇALVES, A. C. A.; REZENDE, R.; BERTONHA, A. Utilização do modelo Cropgro-soybean na determinação de melhores épocas de semeadura da cultura da soja, na região de Palotina, Estado do Paraná. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 28, n. 4, 2006.

DAVIS, K. F.; GEPHART, J. A.; EMERY, K. A.; LEACH, A. M.; GALLOWAY, J. N.; D'ODORICO, P. Meeting future food demand with current agricultural resources. **Global Environmental Change**, v. 39, p. 125-132, 2016.

DOORENBOS, J.; KASSAM, AH. **Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos**. Roma: FAO, 1979.

EMBRAPA - Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária / Fundação ABC. **Mapa do levantamento semi-detalhado de solos**: Município de Castro. Elaborado por: FASOLO, P. J.; CARVALHO, A. P.; BOGNOLA, I. A.; POTER, R. O., 2001.

EMBRAPA - Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.

EMBRAPA - Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária. **Manual de segurança e qualidade para a cultura do milho**. Brasília: Embrapa/Sede, 2004. 78 p

EMBRAPA - Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária. **Tecnologias de Produção de Soja** – Região Central do Brasil 2014. Londrina: Embrapa Soja, 2013.

EMBRAPA CERRADOS. **CEVADA BRS 180**: primeira cultivar de cevada cervejeira para o sistema de produção irrigado do cerrado. Planaltina: Embrapa Cerrados, 1999. Folder Técnico.

FAGUNDES, J. D.; PAULA, G. M. DE; LAGO, I.; STRECK, N. A.; BISOGNIN, D. A. Aquecimento global: efeitos no crescimento, no desenvolvimento e na produtividade de batata. **Ciência Rural**, v. 40, n. 6, p. 1464-1472, 2010.

FANCELLI, A.L.; DOURADO-NETO, D. Produção de milho. **Guaíba: Agropecuária**, 2000. 360p.

FIETZ, C. R.; URCHEI, M. A. Deficiência hídrica da cultura da soja na região de Dourados, MS. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 2, p. 262-265, 2002.

GARCIA E GARCIA, A. **Modelos para área foliar, fitomassa e extração de nutrientes na cultura de arroz**. 112 f. Tese – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

GEAR, N. Evaluación de la respuesta al fotoperíodo en cultivares de cebada cervecera. In: **Reunião Anual de Pesquisa em Cevada**, Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2005.

GOMES, A. C. dos S.; ROBAINA, A. D.; PEITER, M. X.; SOARES, F. C.; PARIZI, A. R. C. Modelo para estimativa da produtividade para a cultura da soja. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 44, n. 1, p. 43-49, 2014.

GOMPERTZ, B. & PHILOS, T. **Roy Soc London**. 115-513. 1825.

GREIN, M. A.; NEVES, L. O.; IELER, J.; MELO, L. C.; GUTZ, T. **Necessidade térmica para a cultura da soja para o Alto Vale do Itajaí – SC**. Trabalho apresentado na 8ª Mostra Nacional de Iniciação Científica e Tecnológica Interdisciplinar, Santa Rosa do Sul, 2015.

HEINEMANN, A. B.; STONE, L. F.; DIDONET, A. D.; TRINDADE, M. da G.; SOARES, B. B.; MOREIRA, J. A. A.; CÁNOVAS, A. D. Eficiência de uso da radiação solar na produtividade do trigo decorrente da adubação nitrogenada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, n.2, p.352-356, 2006.

HOLLINGER, F.; STAATZ, J. M. **Agricultural Growth in West Africa: Market and Policy Drivers**, FAO and African Development Bank. Rome, 2015.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Agropecuário**; 2018. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/economicas/agricultura-e-pecuaria.html>>. Acesso em 13 dez 2018.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. Organizador José Eduardo B. A Monteiro – Brasília, DF: INMET, 2009.

JOHANN, J. A.; ROCHA, J. V.; DUFT, D. G.; LAMPARELLI, R. A. C. Estimativa de áreas com culturas de verão no Paraná, por meio de imagens multitemporais EVI/Modis. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 9, p. 1295-1306, 2012.

JONES, J. W.; ANTLE, J. M.; BASSO, B.; BOOTE, K. J.; CONANT, R. T.; FOSTER, I.; GODFRAY, H. C. J.; HERRERO, M.; HOWITT, R. E.; JANSSEN, S.; KEATING, B. A.; CARPENA, R. M.; PORTER, C. H.; ROSENZWEIG, C.; WHEELER, T. R. Brief history of agricultural systems modeling. **Agricultural Systems**, v. 155, p. 240-254, 2017.

MAIA, E.; SIQUEIRA, D. L.; SILVA, F. F.; PETERNELLI, L. A.; SALOMÃO, L. C. C. Método de comparação de modelos de regressão não-lineares em bananeiras. **Ciência Rural**, v.39, n.5, p.1380-1386, 2009.

MALDANER, L. J.; HORING, K.; SCHNEIDER, J. F.; FRIGO, J. P.; AZEVEDO, K. D. DE; GRZESIUCK, A. E. Exigência agroclimática da cultura do milho (*Zea mays*). **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 3, p. 13-23, 2014.

MONTEIRO, L. A.; SENTELHAS, P. C. Calibration and testing of an agrometeorological model for the estimation of soybean yields in different Brazilian regions. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 36, n. 3, p. 265-272, 2014.

MONTEITH, J. L. Light distribution and photosynthesis in field crops. **Annals of Botany**, Oxford, v. 29, p. 17- 37, 1965.

OMETTO, J. C. Bioclimatologia vegetal. São Paulo: **Agronômica Ceres** 1981. 440p.

OSPINA-NOREÑA, J. E.; DOMÍNGUEZ-RAMÍREZ, C. A.; VEGA-RODRÍGUEZ, E. E.; DARGHAN-CONTRERAS, A. E.; RODRÍGUEZ-MOLANO, L. E. Analysis of the water balance under regional scenarios of climate change for arid zones of Colombia. **Atmósfera**, v. 30, n. 1, p. 63-76, 2017.

PALENCIA, P.; MARTÍNEZ, F.; MEDINA, J. J.; LÓPEZ-MEDINA, J. Strawberry yield efficiency and its correlation with temperature and solar radiation. **Horticultura Brasileira**, v. 31, n. 1, p. 93-99, 2013.

PEDRO JÚNIOR, M. J., CAMARGO, M. B. P. de, MORAES, A. V. de C., FELÍCIO, J. C., CASTRO, J. L. de. Temperatura-base, graus-dia e duração do ciclo para cultivares de triticale. **Bragantia**, Campinas, v. 63, n. 3, p. 447-453, 2004.

PEIXOTO, C. P., CÂMARA, G. M. de S., MARTINS, M. C., MARCHIORI, L. F. S., GUERZONI, R. A., MATTIAZZI, P. Épocas de semeadura e densidade de plantas de soja: I. Componentes da produção e rendimento de grãos. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 57, n. 1, p. 89-96, 2000.

PEIXOTO, C. P.; PEIXOTO, M. F. S. P. **Dinâmica do Crescimento Vegetal**. Universidade Federal da Bahia, Cruz das Almas, 2004.

PIERRI, L. D.; PAULETTI, V.; SILVA, D. A. da; SCHERAIBER, C. F.; SOUZA, J. L. M. de; MUNARO, F. C. Seasonality and potential of energy production from agricultural residual biomass in Campos Gerais, Paraná State. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 63, n. 2, p. 129-137, 2016.

PÔRTO, D. R. de Q.; CECILIO FILHO, A. B.; MAY, A.; VARGAS, P. F. Acúmulo de macronutrientes pela cultivar de cebola Superex estabelecida por semeadura direta. **Ciência Rural**, v. 37, p. 949-955, 2007.

RATKOWSKY, D. A. Nonlinear regression modeling: a unified practical approach. **Marcel Dekker**, New York, 1983.

RITCHIE, S. W.; HANWAY, J. J.; BENSON, G. O. How a corn plant develops. **Special Bulletin**, Iowa, n. 48. 1993.

RODRIGUES, O.; DIDONET, A. D.; LHAMBY, J. C. B.; ROMAN, E. S. Modelo para previsão de estádios de desenvolvimento em trigo. Embrapa Trigo – **Circular técnica online**, Passo Fundo, n. 5, 2001. Disponível em: <http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/p_ci05_4.htm>. Acesso em: 16 janeiro 2019.

SANTOS, H. P. **Aspectos ecofisiológicos na condução da videira e sua influência na produção de vinhedo e na qualidade dos vinhos**. Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 2006. 9p.

SANTOS, V. S. dos; CAMPELO JUNIOR, J. H. Influência dos elementos meteorológicos na produção de adubos verdes, em diferentes épocas de semeadura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 1, p. 91-98, 2003.

SAVIN, R.; STONE, P. J.; NICOLAS, M. E.; WARLAW, I. F. Grain growth and malting quality of barley: 1-Effects of heat stress and moderately high temperature. **Australian Journal of Agricultural Research**, Collingwood, v. 48, 1997.

SCOLARI, D. D. G. **Produção agrícola mundial: o potencial do Brasil**. In: VISÃO PROGRESSISTA DO AGRONEGÓCIO BRASILEIRO. Brasília, DF: Fundação Milton Campos, 2006. p. 9-86.

SILVA, A.P.P.; MARQUES, B.S.; LIMA, R.S.O.; MACHADO, E.C.R.; GONÇALVES, M.F.; CARVALHO, S.J.P. Crescimento e desenvolvimento de plantas daninhas com base em dias ou unidades térmicas. **Planta Daninha**, v. 32, n. 1, p. 81-89, 2014.

SILVA, L. L. da; COSTA, R. F. da; CAMPOS, J. H. B. da C.; DANTAS, R. T. Influência das precipitações na produtividade agrícola no Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v.13, n.4, p. 454-461, 2009.

SILVA, V. DE P. R. DA; SILVA, R. A. E; MACIEL, G. F.; BRAGA, C. C.; SILVA JÚNIOR, J. L. C. DA; SOUZA, E. P. DE; ALMEIDA, R. S. R.; SILVA, M. T.; HOLANDA, R. M. DE. Calibration and validation of the AquaCrop model for the soybean crop grown under different levels of irrigation in the Motopiba region, Brazil. **Ciência Rural**, v. 48, n. 1, e20161118, 2018.

SOUZA, P. J. O. P.; ABREU, J. P. M. M.; ROCHA, E. J. P.; RIBEIRO, A. Exigência térmica da soja nas condições climáticas da Amazônia. XVI CBMET - Congresso Brasileiro de Meteorologia. **Anais - Agrometeorologia, Micrometeorologia e Hidrometeorologia**. 2010.

STREIBIG, J. C. Herbicide bioassay. **Weed Res.**, v. 28, n. 6, p. 479-484, 1988.

Trnka, M.; Eitzinger, J.; Kapler, P.; Dubrovský, M.; Semerádová, D.; Žalud, Z. ěk; Formayer, H. Effect of Estimated Daily Global Solar Radiation Data on the Results of Crop Growth Models. **Sensors** (Basel, Switzerland), v. 7, n. 10, p. 2330–2362, 2007.

VITOUSEK, P. M.; MOONEY, H.A.; LUBCHENCO, J.; MELILLO, J.M. Human domination of earth's ecosystems. **Science**, v. 277, p. 494-499, 1997.

WAZILEWSKI, W. T.; SANTOS, R. F.; BASSEGIO, D. Exigência térmica da cultura da soja para a região de Cascavel - Paraná. **Revista Cultivando o Saber**. Cascavel-PR, v.4, n.3, p.130-139, 2011.

WEIRICH NETO, P. H. **Importância de Atributos Agronômicos para Qualificação da Semeadura do Milho (*Zea mays* L.) no Sistema Plantio Direto na Região dos Campos Gerais–PR**. Tese - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; O'DONNELL, J. & ROWE, C. M. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, v. 90, n. 5, p. 8995-9005, 1985.

WISLIE, C. P. Crop adaptation and distribution. **São Francisco**: W. H. Freeman and Company, 1962.

XU, H.; WANG, X. Effects of altered precipitation regimes on plant productivity in the arid region of northern China. **Ecological Informatics**, v. 31, p. 137-146, 2016.

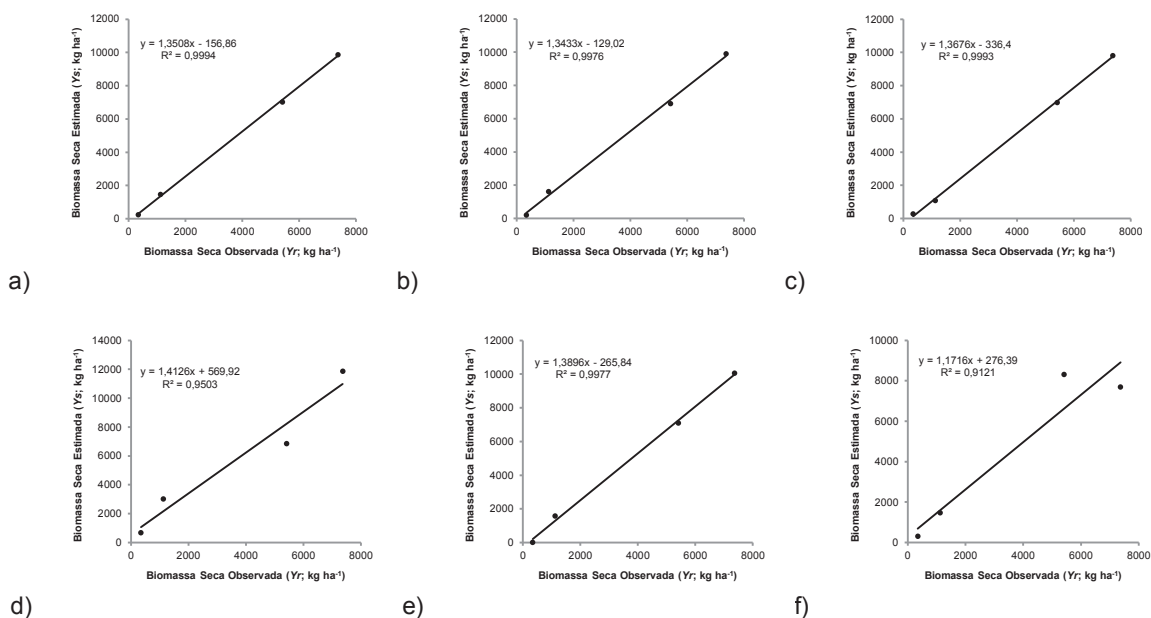
YANG, X.; CHEN, F.; LIN, X.; LIU, Z.; ZHANG, H.; ZHAO, J.; LI K.; YE, Q.; LI, Y.; LV S.; YANG, P.; WU, W.; LI, Z.; LAL, R.; TANG, H. Potential benefits of climate change for crop productivity in China. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 208, n. 15, p. 76-84, 2015.

ZHOU, Y.; STAATZ, J. Projected demand and supply for various foods in West Africa: Implications for investments and food policy. **Food Policy**, v. 61, p. 198-212, 2016.

ZIMMERMANN, A.; WEBBER, H.; ZHAO, G.; EWERT, F.; KROS, J.; WOLF, J.; BRITZ, W.; VRIES, W. Climate change impacts on crop yields, land use and environment in response to crop sowing dates and thermal time requirements. **Agricultural Systems**, v. 157, p. 81-92, 2017.

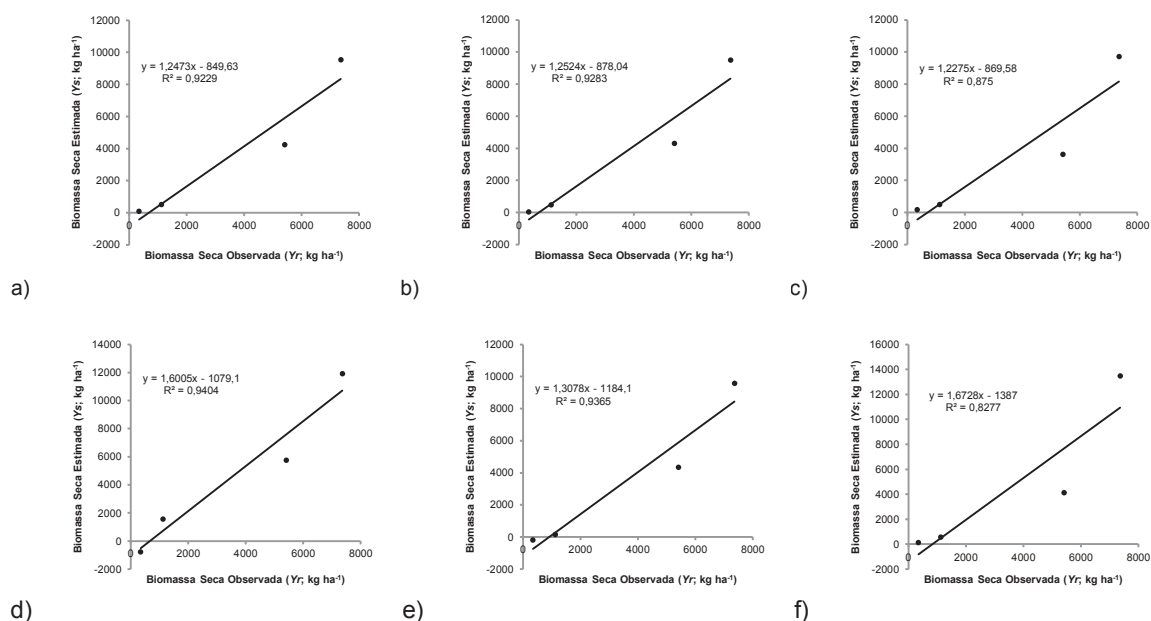
APÊNDICE 1 – REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) ENTRE BIOMASSA SECA ESTIMADA (Y_s) vs OBSERVADA (Y_r) NAS SAFRAS UTILIZADAS PARA CALIBRAÇÃO DA CULTURA SOJA, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS.

FIGURA A1.1 – REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) ENTRE BIOMASSA SECA ESTIMADA (Y_s) vs OBSERVADA (Y_r) DA SAFRA “CASTRO 2006/2007” DA CULTURA SOJA, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, TENDO DIAS APÓS O PLANTIO (DAP) COMO VARIÁVEIS DE ENTRADA NA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS MODELOS: a) STREIBIG (1988); b) GOMPertz E PHILOS (1825); c) RATKOWSKY (1983); d) BRODY (1945); e) BERTALANFFY (1957); E, f) GARCIA E GARCIA (2002)



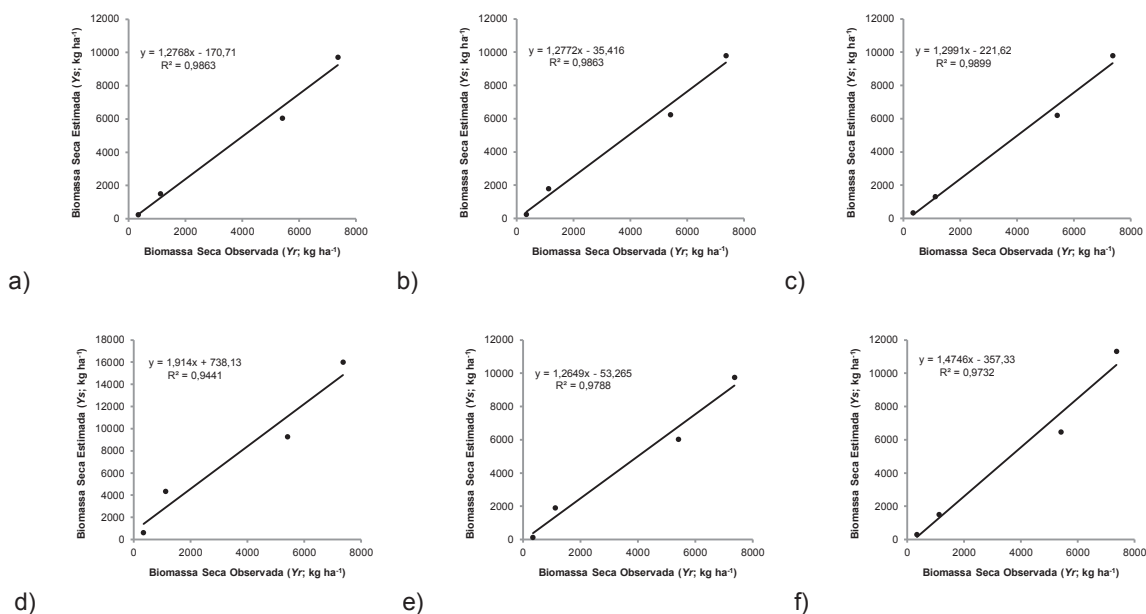
FONTE: O autor (2019).

FIGURA A1.2 – REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) ENTRE BIOMASSA SECA ESTIMADA (Y_s) vs OBSERVADA (Y_r) DA SAFRA “CASTRO 2006/2007” DA CULTURA SOJA, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, TENDO GRAUS DIAS ACUMULADOS (GDA) COMO VARIÁVEIS DE ENTRADA NA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS MODELOS: a) STREIBIG (1988); b) GOMPertz E PHILOS (1825); c) RATKOWSKY (1983); d) BRODY (1945); e) BERTALANFFY (1957); E, f) GARCIA E GARCIA (2002)



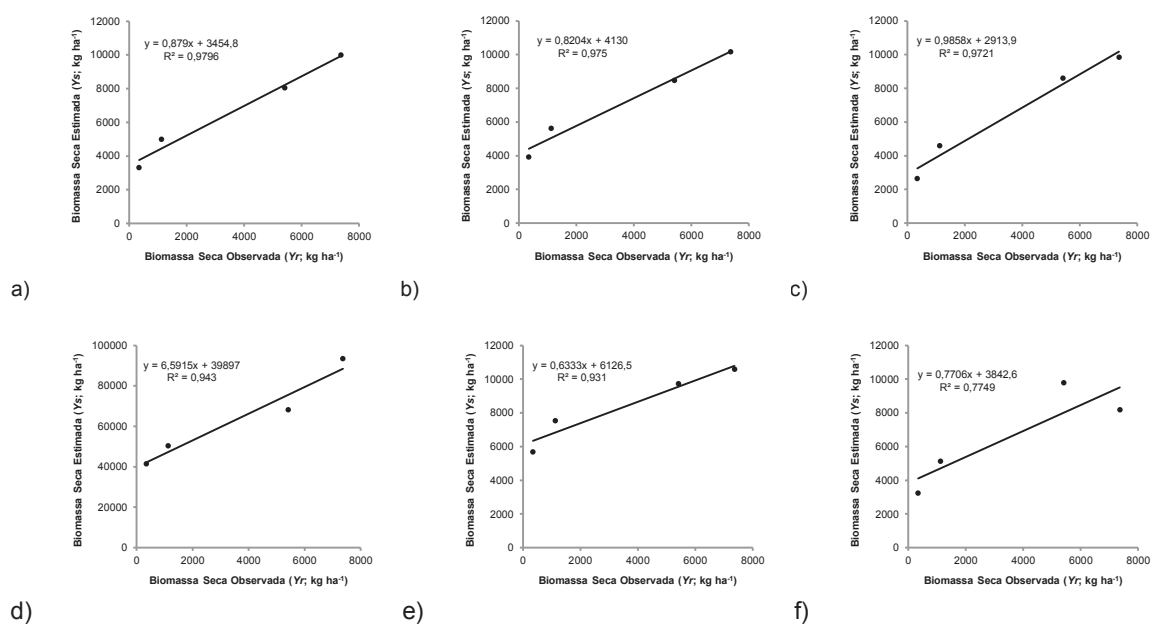
FONTE: O autor (2019).

FIGURA A1.3 – REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) ENTRE BIOMASSA SECA ESTIMADA (Y_s) vs OBSERVADA (Y_r) DA SAFRA “CASTRO 2006/2007” DA CULTURA SOJA, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, TENDO RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE ACUMULADA (R_s) COMO VARIÁVEIS DE ENTRADA NA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS MODELOS: a) STREIBIG (1988); b) GOMPERTZ E PHILOS (1825); c) RATKOWSKY (1983); d) BRODY (1945); e) BERTALANFFY (1957); E, f) GARCIA E GARCIA (2002)



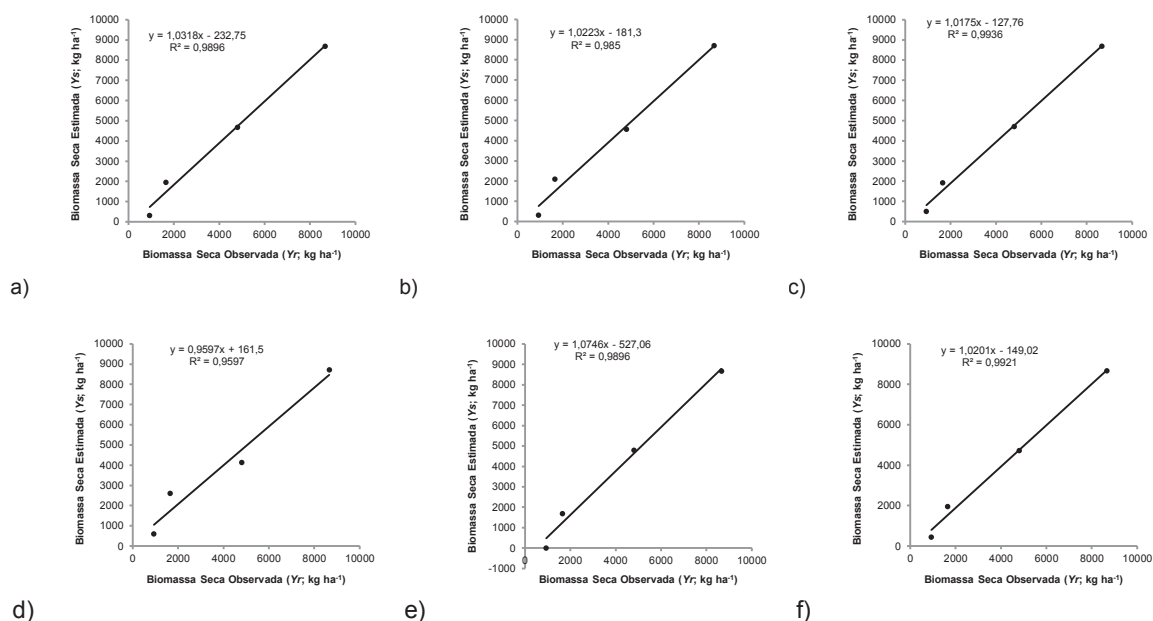
FONTE: O autor (2019).

FIGURA A1.4 – REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) ENTRE BIOMASSA SECA ESTIMADA (Y_s) vs OBSERVADA (Y_r) DA SAFRA “CASTRO 2006/2007” DA CULTURA SOJA, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, TENDO PRECIPITAÇÃO ACUMULADA (P) COMO VARIÁVEIS DE ENTRADA NA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS MODELOS: a) STREIBIG (1988); b) GOMPERTZ E PHILOS (1825); c) RATKOWSKY (1983); d) BRODY (1945); e) BERTALANFFY (1957); E, f) GARCIA E GARCIA (2002)



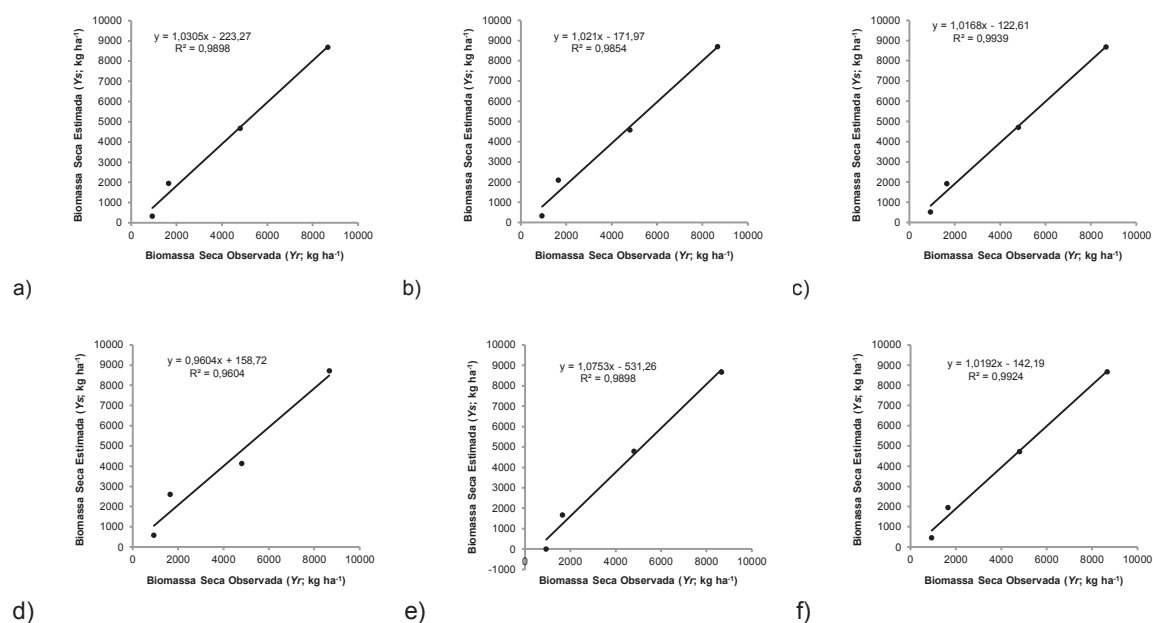
FONTE: O autor (2019).

FIGURA A1.5 – REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) ENTRE BIOMASSA SECA ESTIMADA (Y_s) vs OBSERVADA (Y_r) DA SAFRA “PONTA GROSSA 2006/2007” DA CULTURA SOJA, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, TENDO DIAS APÓS O PLANTIO (DAP) COMO VARIÁVEIS DE ENTRADA NA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS MODELOS: a) STREIBIG (1988); b) GOMPertz E PHILOS (1825); c) RATKOWSKY (1983); d) BRODY (1945); e) BERTALANFFY (1957); E, f) GARCIA E GARCIA (2002)



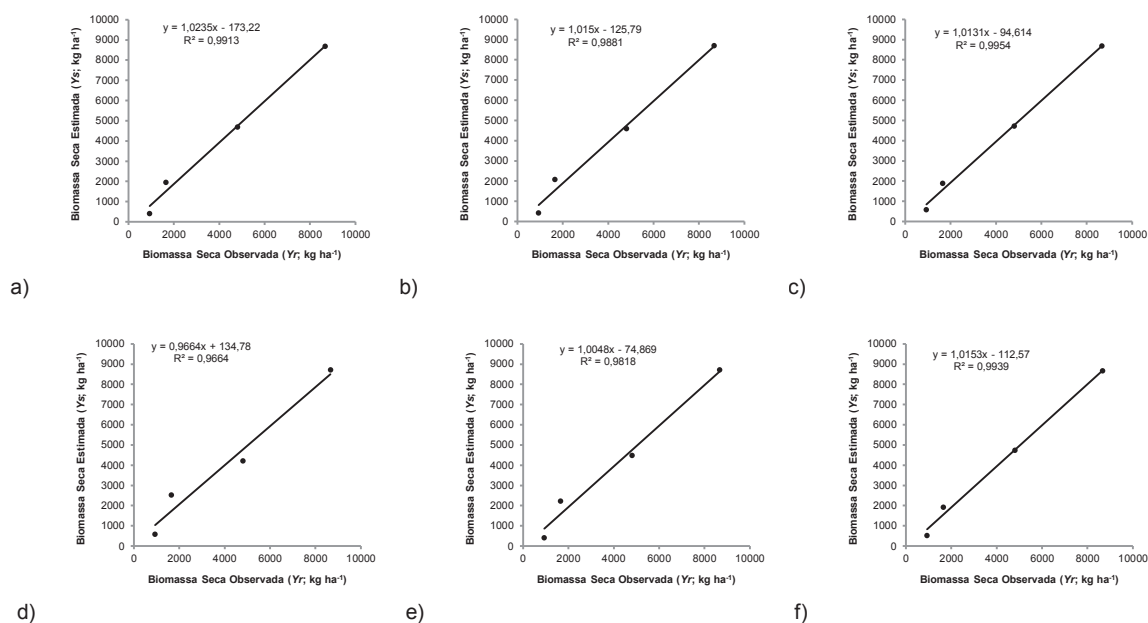
FONTE: O autor (2019).

FIGURA A1.6 – REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) ENTRE BIOMASSA SECA ESTIMADA (Y_s) vs OBSERVADA (Y_r) DA SAFRA “PONTA GROSSA 2006/2007” DA CULTURA SOJA, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, TENDO GRAUS DIAS ACUMULADOS (GDA) COMO VARIÁVEIS DE ENTRADA NA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS MODELOS: a) STREIBIG (1988); b) GOMPertz E PHILOS (1825); c) RATKOWSKY (1983); d) BRODY (1945); e) BERTALANFFY (1957); E, f) GARCIA E GARCIA (2002)



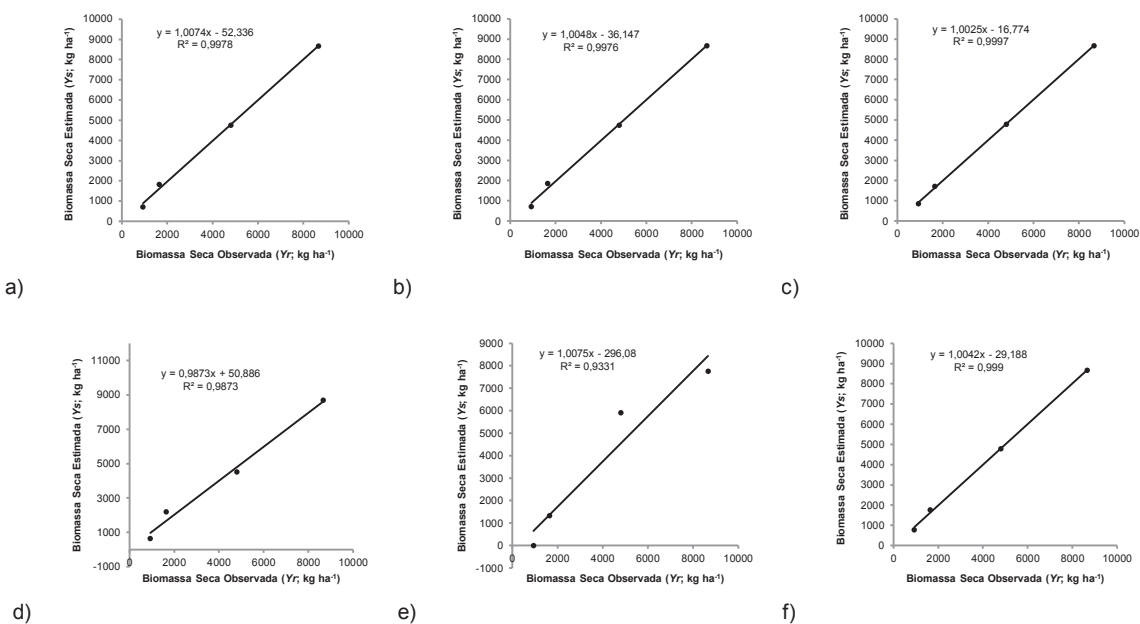
FONTE: O autor (2019).

FIGURA A1.7 – REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) ENTRE BIOMASSA SECA ESTIMADA (Y_s) vs OBSERVADA (Y_r) DA SAFRA “PONTA GROSSA 2006/2007” DA CULTURA SOJA, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, TENDO RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE ACUMULADA (R_s) COMO VARIÁVEIS DE ENTRADA NA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS MODELOS: a) STREIBIG (1988); b) GOMPERTZ E PHILOS (1825); c) RATKOWSKY (1983); d) BRODY (1945); e) BERTALANFFY (1957); E, f) GARCIA E GARCIA (2002)



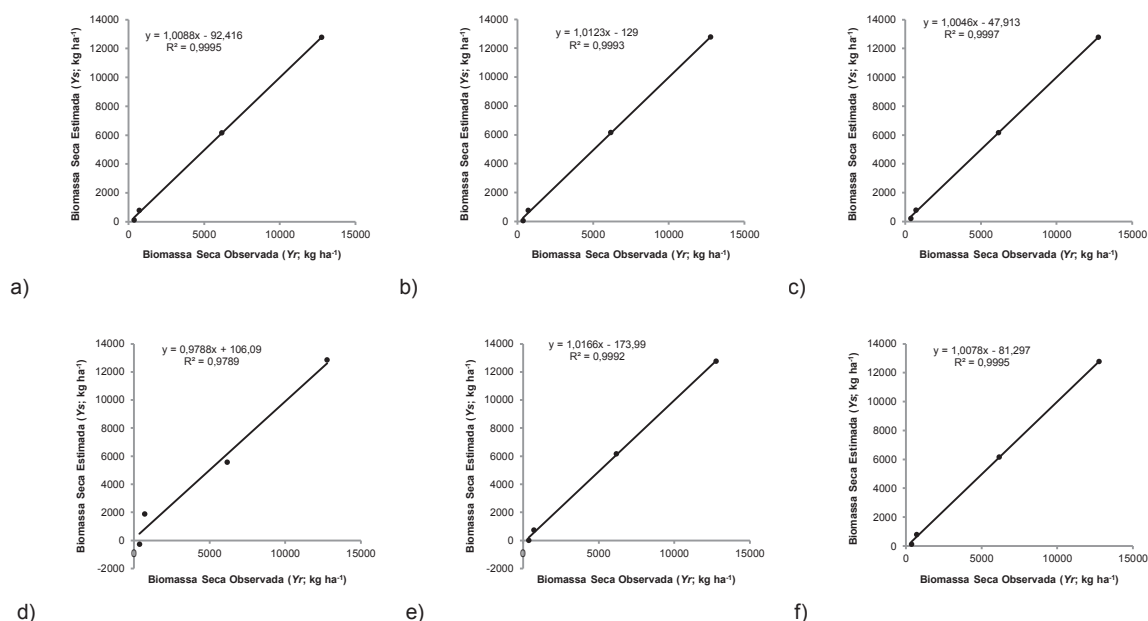
FONTE: O autor (2019).

FIGURA A1.8 – REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) ENTRE BIOMASSA SECA ESTIMADA (Y_s) vs OBSERVADA (Y_r) DA SAFRA “PONTA GROSSA 2006/2007” DA CULTURA SOJA, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, TENDO PRECIPITAÇÃO ACUMULADA (P) COMO VARIÁVEIS DE ENTRADA NA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS MODELOS: a) STREIBIG (1988); b) GOMPERTZ E PHILOS (1825); c) RATKOWSKY (1983); d) BRODY (1945); e) BERTALANFFY (1957); E, f) GARCIA E GARCIA (2002)



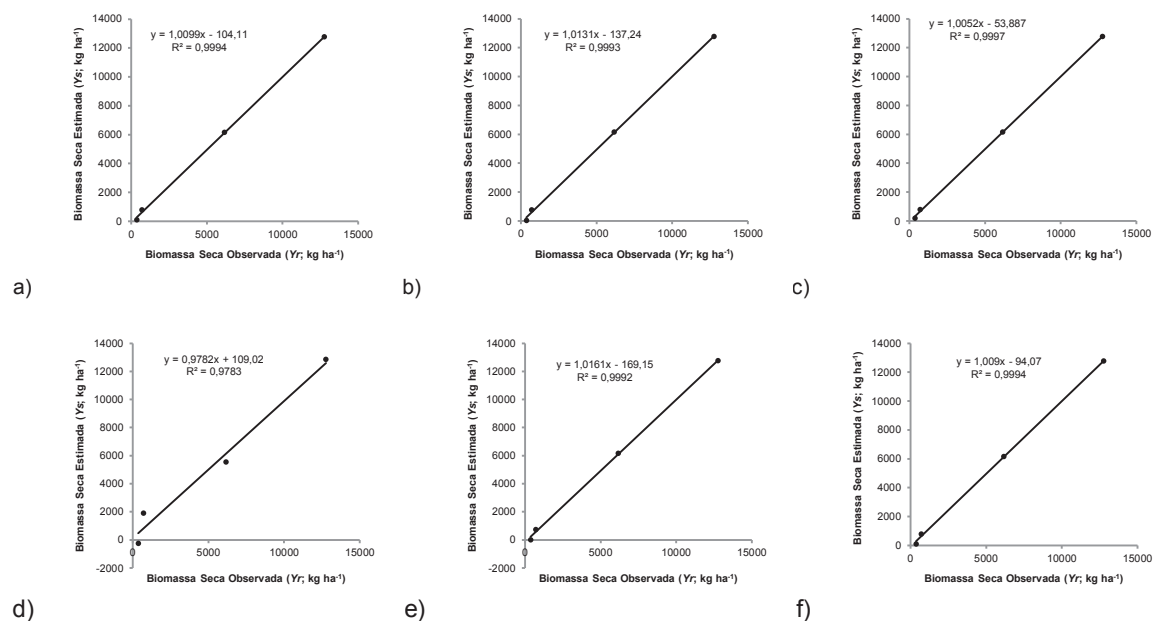
FONTE: O autor (2019).

FIGURA A1.9 – REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) ENTRE BIOMASSA SECA ESTIMADA (Y_s) vs OBSERVADA (Y_r) DA SAFRA “PONTA GROSSA 2007/2008” DA CULTURA SOJA, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, TENDO DIAS APÓS O PLANTIO (DAP) COMO VARIÁVEIS DE ENTRADA NA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS MODELOS: a) STREIBIG (1988); b) GOMPERTZ E PHILOS (1825); c) RATKOWSKY (1983); d) BRODY (1945); e) BERTALANFFY (1957); E, f) GARCIA E GARCIA (2002)



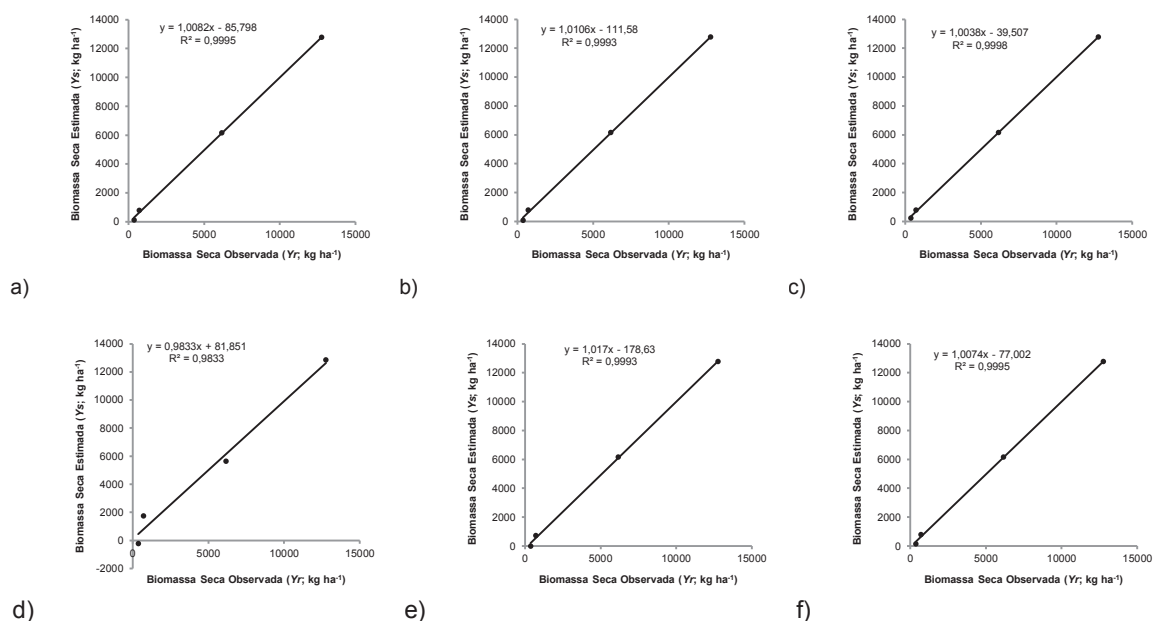
FONTE: O autor (2019).

FIGURA A1.10 – REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) ENTRE BIOMASSA SECA ESTIMADA (Y_s) vs OBSERVADA (Y_r) DA SAFRA “PONTA GROSSA 2007/2008” DA CULTURA SOJA, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, TENDO GRAUS DIAS ACUMULADOS (GDA) COMO VARIÁVEIS DE ENTRADA NA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS MODELOS: a) STREIBIG (1988); b) GOMPERTZ E PHILOS (1825); c) RATKOWSKY (1983); d) BRODY (1945); e) BERTALANFFY (1957); E, f) GARCIA E GARCIA (2002)



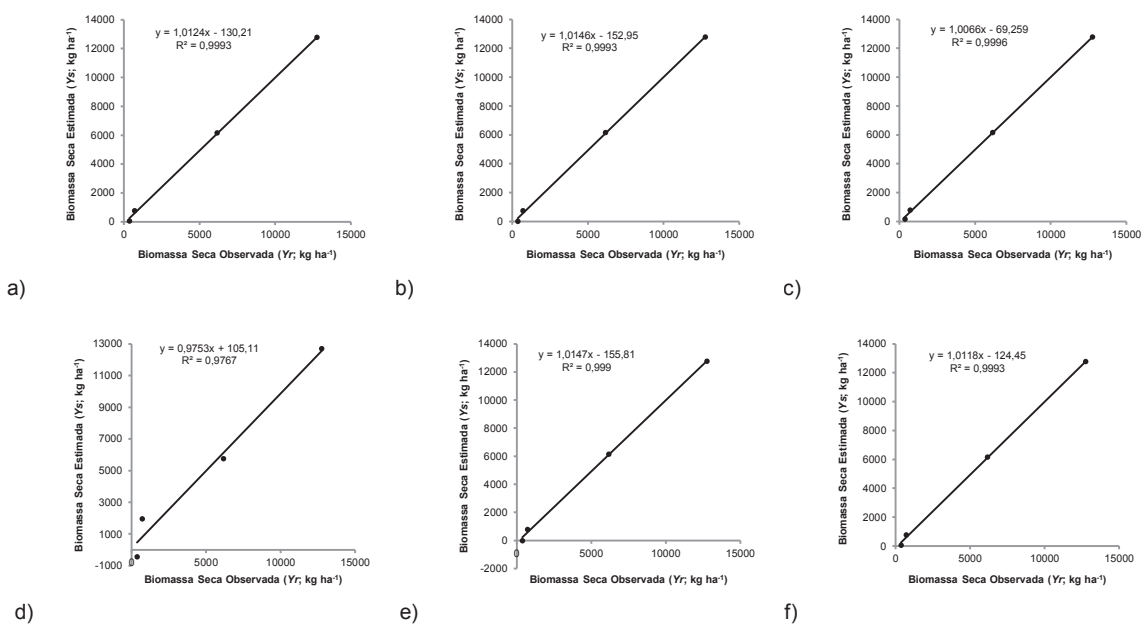
FONTE: O autor (2019).

FIGURA A1.11 – REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) ENTRE BIOMASSA SECA ESTIMADA (Y_s) vs OBSERVADA (Y_r) DA SAFRA “PONTA GROSSA 2007/2008” DA CULTURA SOJA, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, TENDO RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE ACUMULADA (R_s) COMO VARIÁVEIS DE ENTRADA NA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS MODELOS: a) STREIBIG (1988); b) GOMPERTZ E PHILOS (1825); c) RATKOWSKY (1983); d) BRODY (1945); e) BERTALANFFY (1957); E, f) GARCIA E GARCIA (2002)



FONTE: O autor (2019).

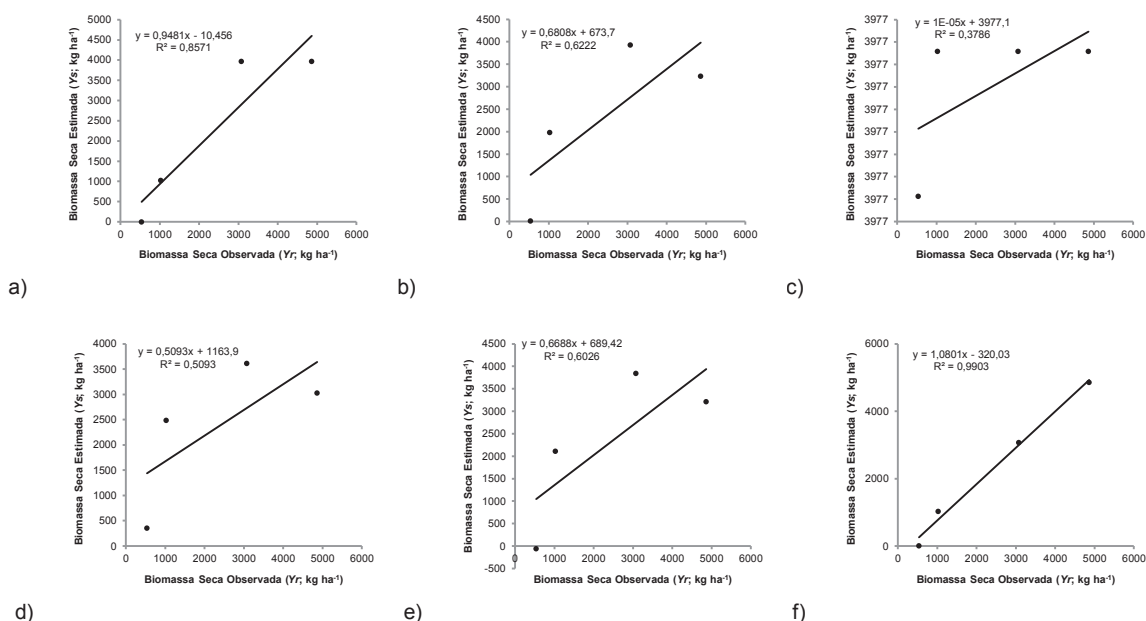
FIGURA A1.12 – REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) ENTRE BIOMASSA SECA ESTIMADA (Y_s) vs OBSERVADA (Y_r) DA SAFRA “PONTA GROSSA 2007/2008” DA CULTURA SOJA, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, TENDO PRECIPITAÇÃO ACUMULADA (P) COMO VARIÁVEIS DE ENTRADA NA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS MODELOS: a) STREIBIG (1988); b) GOMPERTZ E PHILOS (1825); c) RATKOWSKY (1983); d) BRODY (1945); e) BERTALANFFY (1957); E, f) GARCIA E GARCIA (2002)



FONTE: O autor (2019).

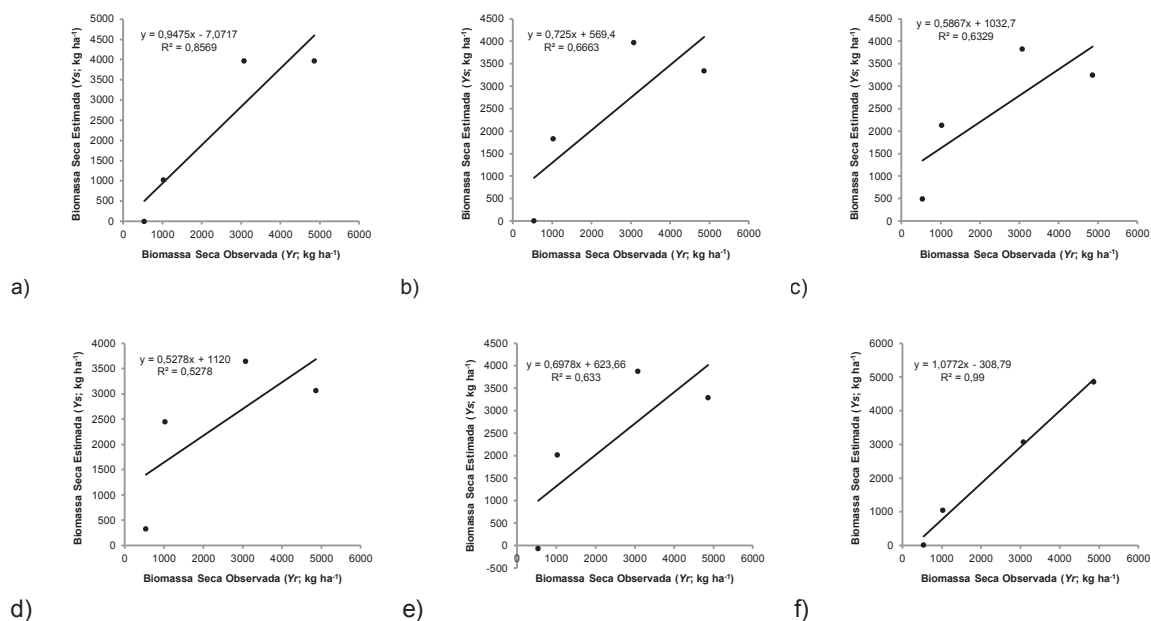
APÊNDICE 2 – REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) ENTRE BIOMASSA SECA ESTIMADA (Y_s) vs OBSERVADA (Y_r) NAS SAFRAS UTILIZADAS PARA CALIBRAÇÃO DA CULTURA MILHO, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS.

FIGURA A2.1 – REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) ENTRE BIOMASSA SECA ESTIMADA (Y_s) vs OBSERVADA (Y_r) DA SAFRA “CASTRO 2006/2007” DA CULTURA MILHO, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, TENDO DIAS APÓS O PLANTIO (DAP) COMO VARIÁVEIS DE ENTRADA NA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS MODELOS: a) STREIBIG (1988); b) GOMPertz E PHILOS (1825); c) RATKOWSKY (1983); d) BRODY (1945); e) BERTALANFFY (1957); E, f) GARCIA E GARCIA (2002)



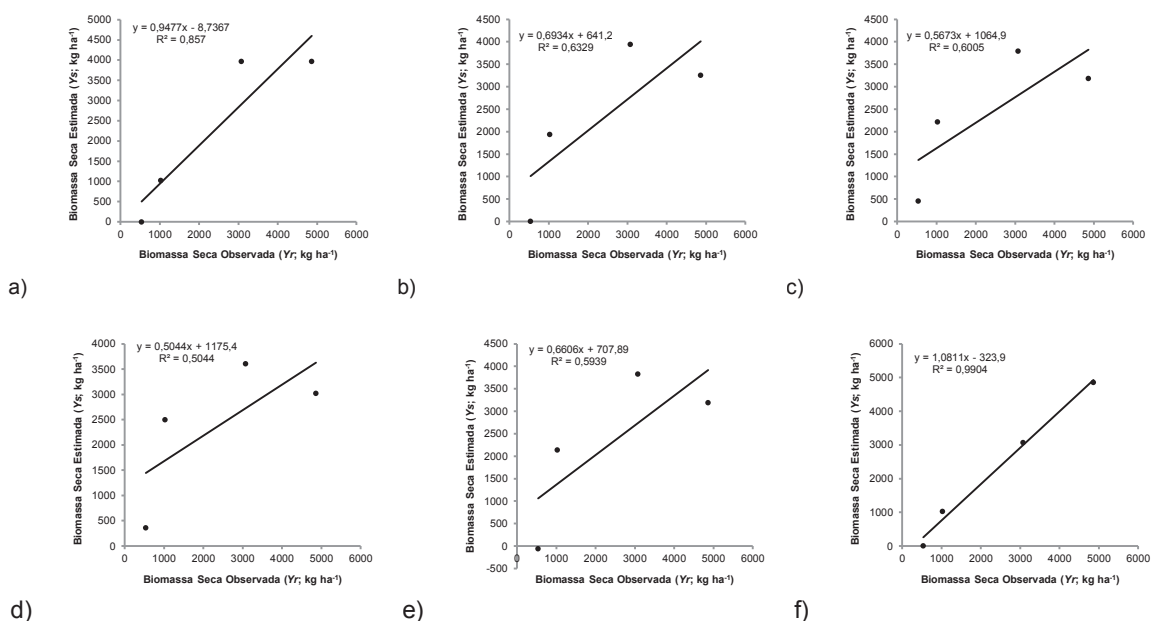
FONTE: O autor (2019).

FIGURA A2.2 – REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) ENTRE BIOMASSA SECA ESTIMADA (Y_s) vs OBSERVADA (Y_r) DA SAFRA “CASTRO 2006/2007” DA CULTURA MILHO, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, TENDO GRAUS DIAS ACUMULADOS (GDA) COMO VARIÁVEIS DE ENTRADA NA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS MODELOS: a) STREIBIG (1988); b) GOMPertz E PHILOS (1825); c) RATKOWSKY (1983); d) BRODY (1945); e) BERTALANFFY (1957); E, f) GARCIA E GARCIA (2002)



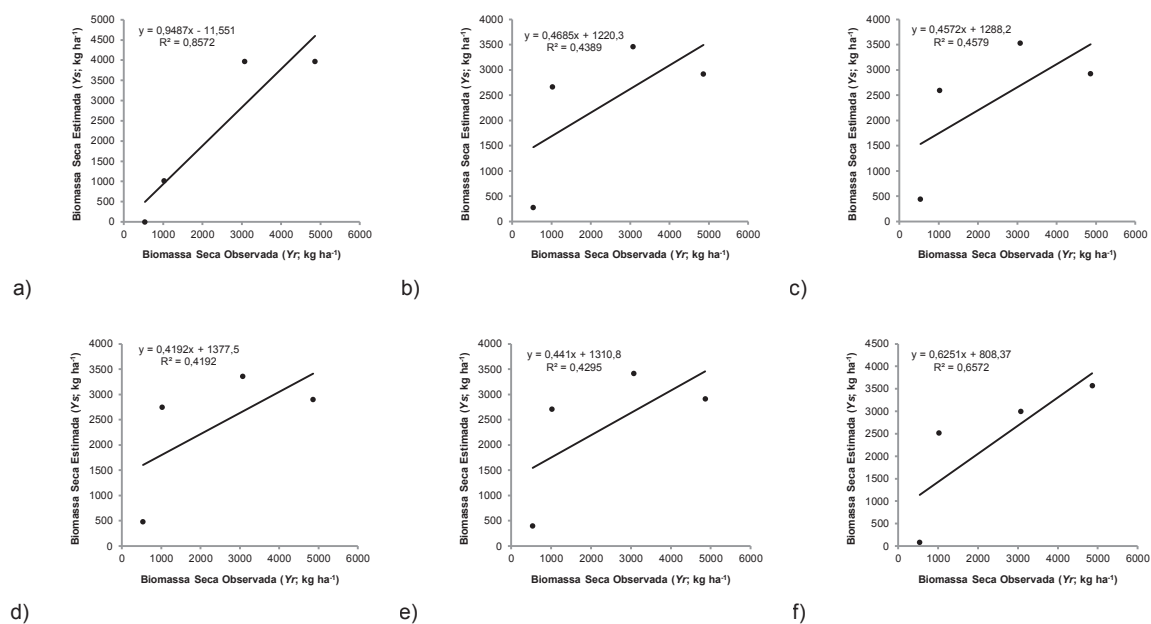
FONTE: O autor (2019).

FIGURA A2.3 – REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) ENTRE BIOMASSA SECA ESTIMADA (Y_s) vs OBSERVADA (Y_r) DA SAFRA “CASTRO 2006/2007” DA CULTURA MILHO, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, TENDO RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE ACUMULADA (R_s) COMO VARIÁVEIS DE ENTRADA NA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS MODELOS: a) STREIBIG (1988); b) GOMPertz E PHILOS (1825); c) RATKOWSKY (1983); d) BRODY (1945); e) BERTALANFFY (1957); E, f) GARCIA E GARCIA (2002)



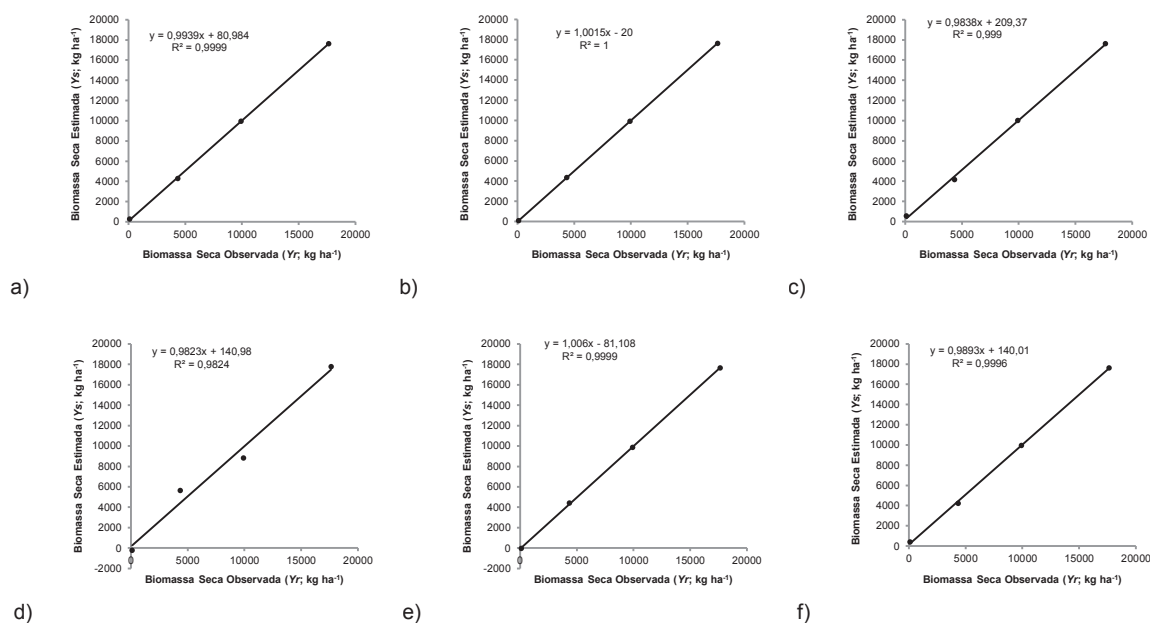
FONTE: O autor (2019).

FIGURA A2.4 – REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) ENTRE BIOMASSA SECA ESTIMADA (Y_s) vs OBSERVADA (Y_r) DA SAFRA “CASTRO 2006/2007” DA CULTURA MILHO, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, TENDO PRECIPITAÇÃO ACUMULADA (P) COMO VARIÁVEIS DE ENTRADA NA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS MODELOS: a) STREIBIG (1988); b) GOMPertz E PHILOS (1825); c) RATKOWSKY (1983); d) BRODY (1945); e) BERTALANFFY (1957); E, f) GARCIA E GARCIA (2002)



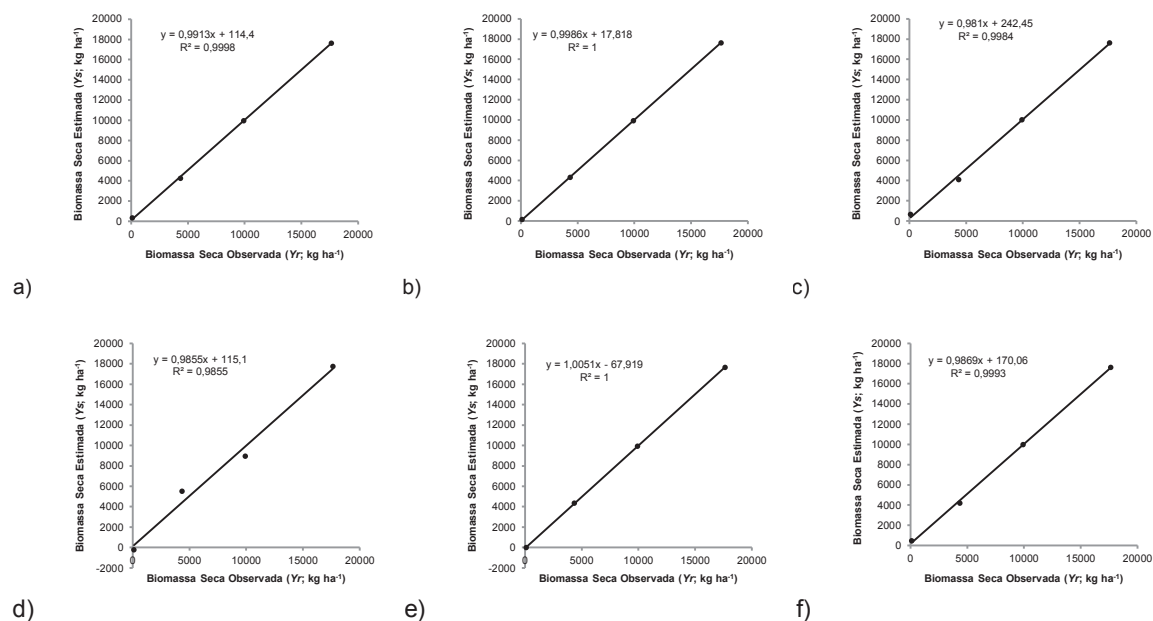
FONTE: O autor (2019).

FIGURA A2.5 – REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) ENTRE BIOMASSA SECA ESTIMADA (Y_s) vs OBSERVADA (Y_r) DA SAFRA “CASTRO 2007/2008a” DA CULTURA MILHO, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, TENDO DIAS APÓS O PLANTIO (DAP) COMO VARIÁVEIS DE ENTRADA NA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS MODELOS: a) STREIBIG (1988); b) GOMPERTZ E PHILOS (1825); c) RATKOWSKY (1983); d) BRODY (1945); e) BERTALANFFY (1957); E, f) GARCIA E GARCIA (2002)



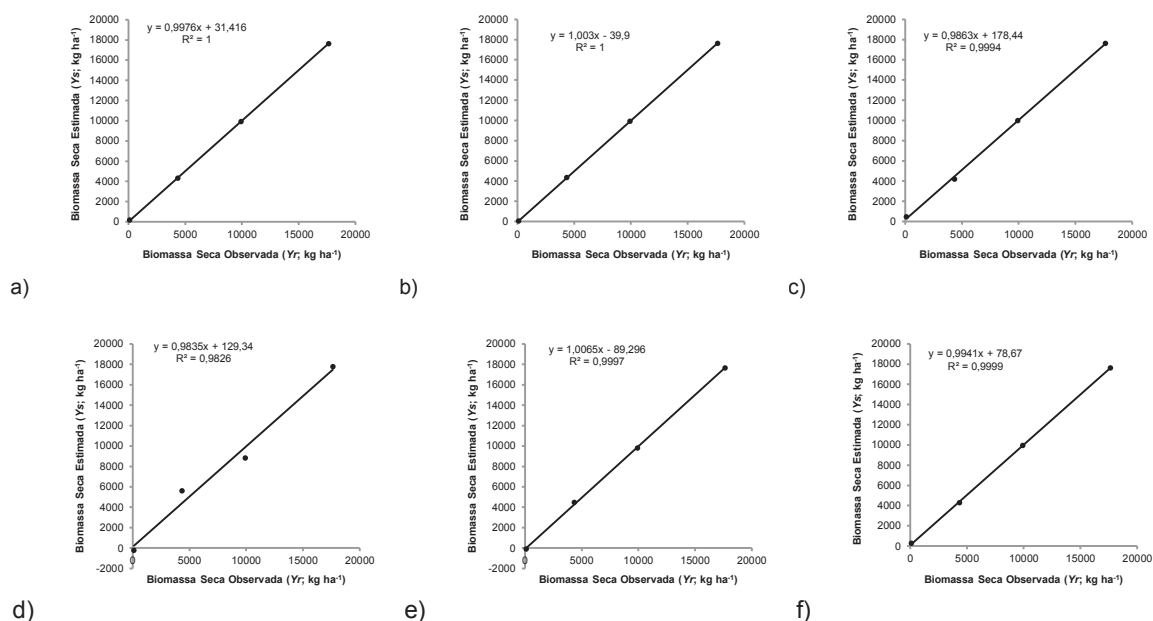
FONTE: O autor (2019).

FIGURA A2.6 – REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) ENTRE BIOMASSA SECA ESTIMADA (Y_s) vs OBSERVADA (Y_r) DA SAFRA “CASTRO 2007/2008a” DA CULTURA MILHO, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, TENDO GRAUS DIAS ACUMULADOS (GDA) COMO VARIÁVEIS DE ENTRADA NA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS MODELOS: a) STREIBIG (1988); b) GOMPERTZ E PHILOS (1825); c) RATKOWSKY (1983); d) BRODY (1945); e) BERTALANFFY (1957); E, f) GARCIA E GARCIA (2002)



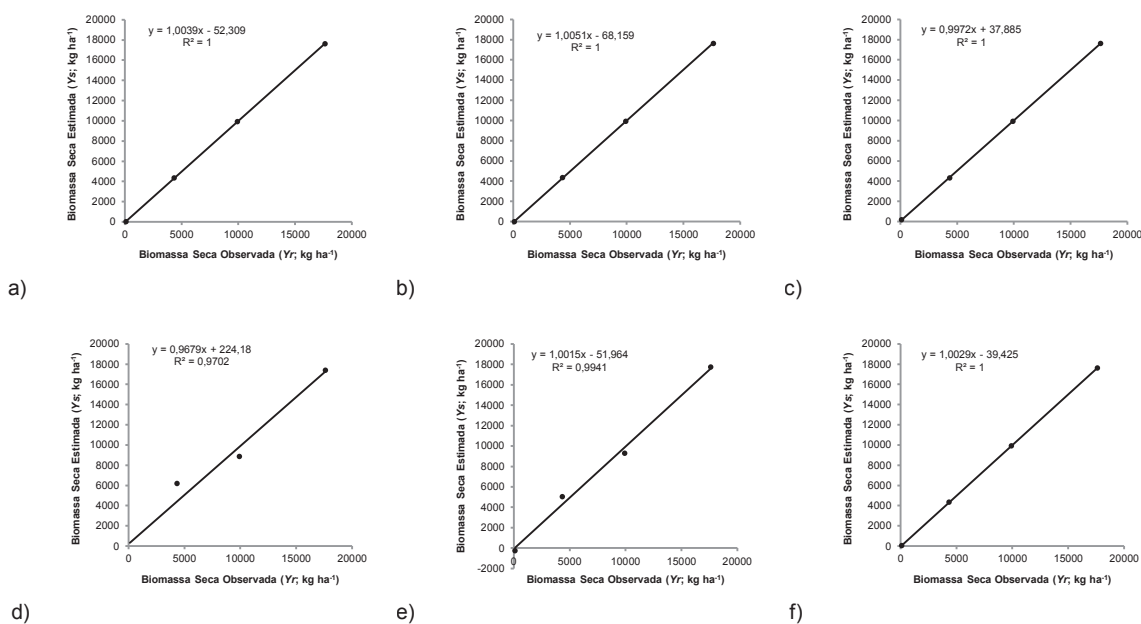
FONTE: O autor (2019).

FIGURA A2.7 – REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) ENTRE BIOMASSA SECA ESTIMADA (Y_s) vs OBSERVADA (Y_r) DA SAFRA “CASTRO 2007/2008a” DA CULTURA MILHO, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, TENDO RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE ACUMULADA (R_s) COMO VARIÁVEIS DE ENTRADA NA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS MODELOS: a) STREIBIG (1988); b) GOMPERTZ E PHILOS (1825); c) RATKOWSKY (1983); d) BRODY (1945); e) BERTALANFFY (1957); E, f) GARCIA E GARCIA (2002)



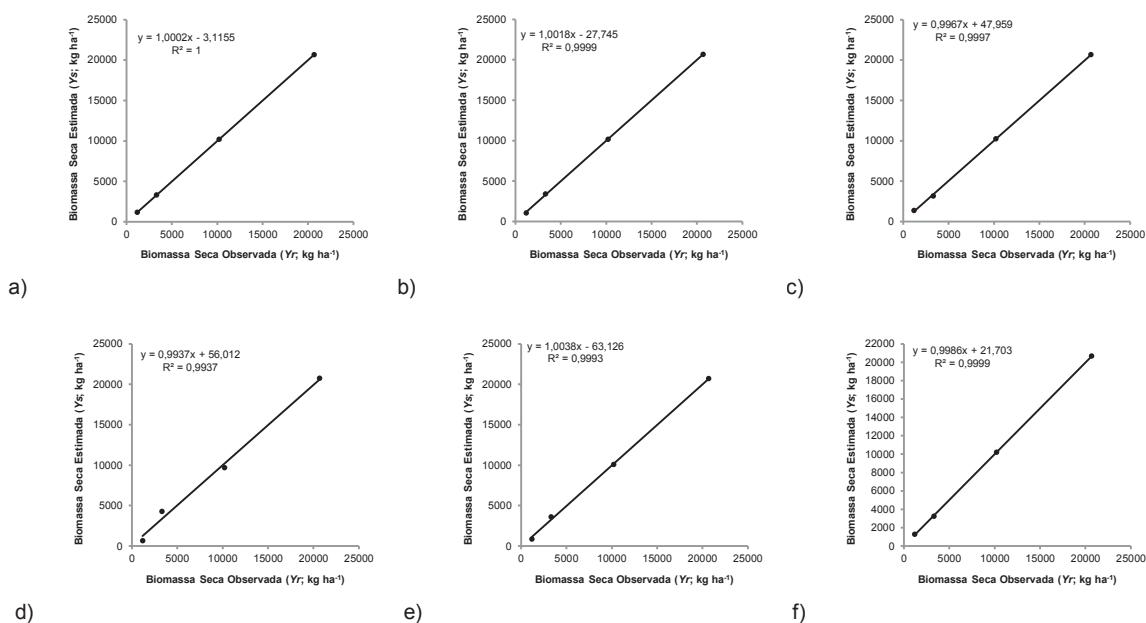
FONTE: O autor (2019).

FIGURA A2.8 – REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) ENTRE BIOMASSA SECA ESTIMADA (Y_s) vs OBSERVADA (Y_r) DA SAFRA “CASTRO 2007/2008a” DA CULTURA MILHO, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, TENDO PRECIPITAÇÃO ACUMULADA (P) COMO VARIÁVEIS DE ENTRADA NA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS MODELOS: a) STREIBIG (1988); b) GOMPERTZ E PHILOS (1825); c) RATKOWSKY (1983); d) BRODY (1945); e) BERTALANFFY (1957); E, f) GARCIA E GARCIA (2002)



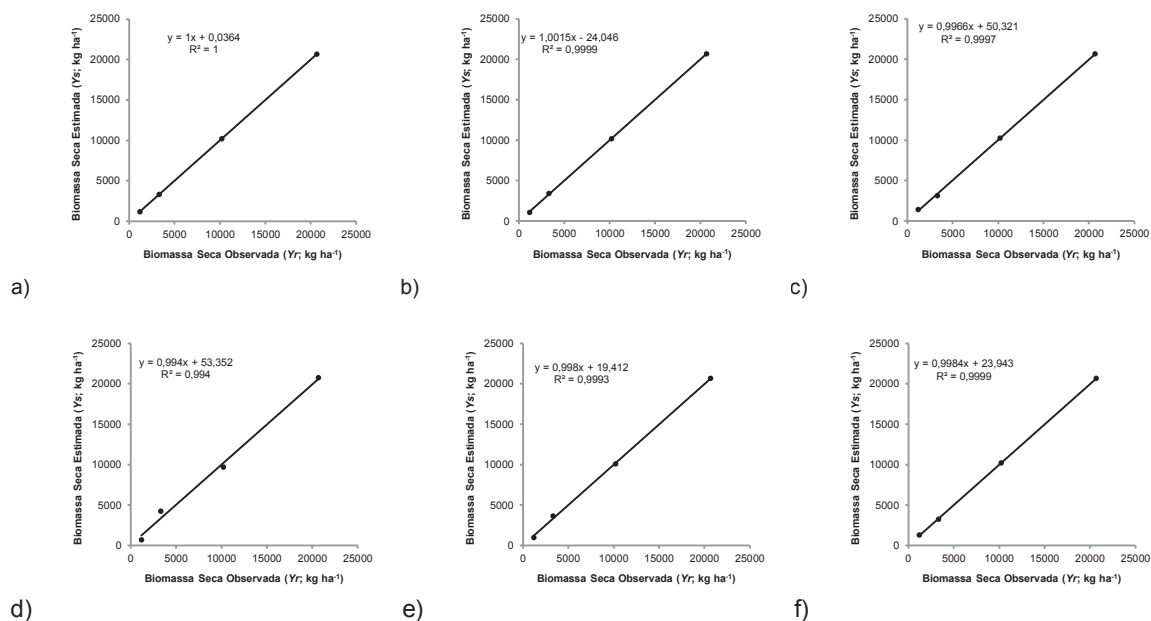
FONTE: O autor (2019).

FIGURA A2.9 – REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) ENTRE BIOMASSA SECA ESTIMADA (Y_s) vs OBSERVADA (Y_r) DA SAFRA “PONTA GROSSA 2007/2008” DA CULTURA MILHO, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, TENDO DIAS APÓS O PLANTIO (DAP) COMO VARIÁVEIS DE ENTRADA NA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS MODELOS: a) STREIBIG (1988); b) GOMPERTZ E PHILOS (1825); c) RATKOWSKY (1983); d) BRODY (1945); e) BERTALANFFY (1957); E, f) GARCIA E GARCIA (2002)



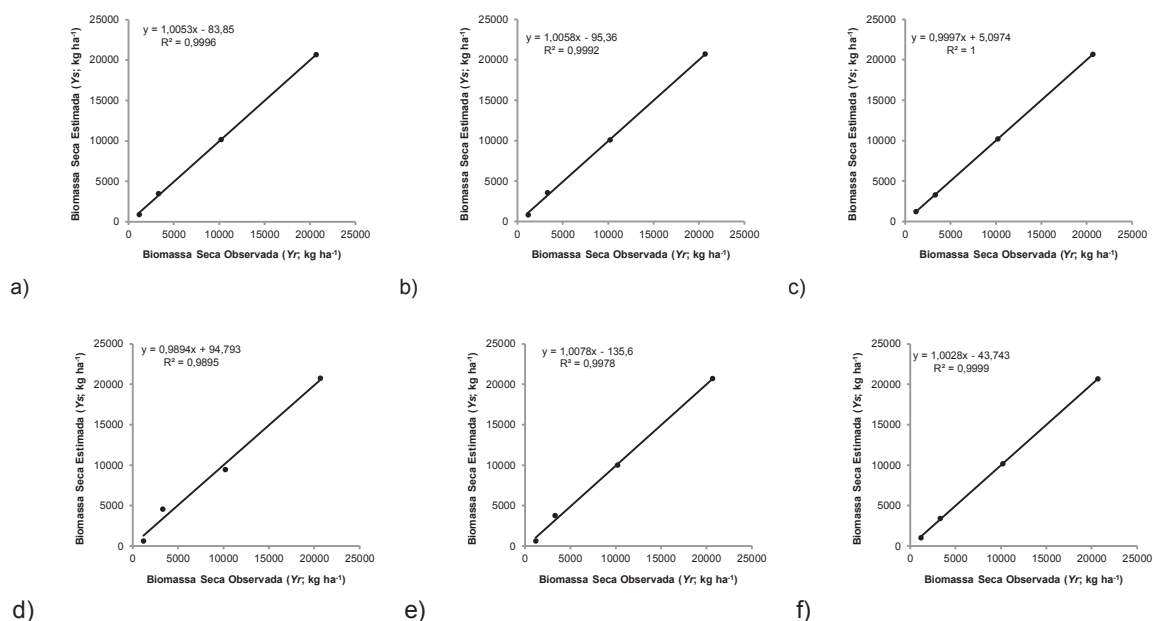
FONTE: O autor (2019).

FIGURA A2.10 – REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) ENTRE BIOMASSA SECA ESTIMADA (Y_s) vs OBSERVADA (Y_r) DA SAFRA “PONTA GROSSA 2007/2008” DA CULTURA MILHO, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, TENDO GRAUS DIAS ACUMULADOS (GDA) COMO VARIÁVEIS DE ENTRADA NA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS MODELOS: a) STREIBIG (1988); b) GOMPERTZ E PHILOS (1825); c) RATKOWSKY (1983); d) BRODY (1945); e) BERTALANFFY (1957); E, f) GARCIA E GARCIA (2002)



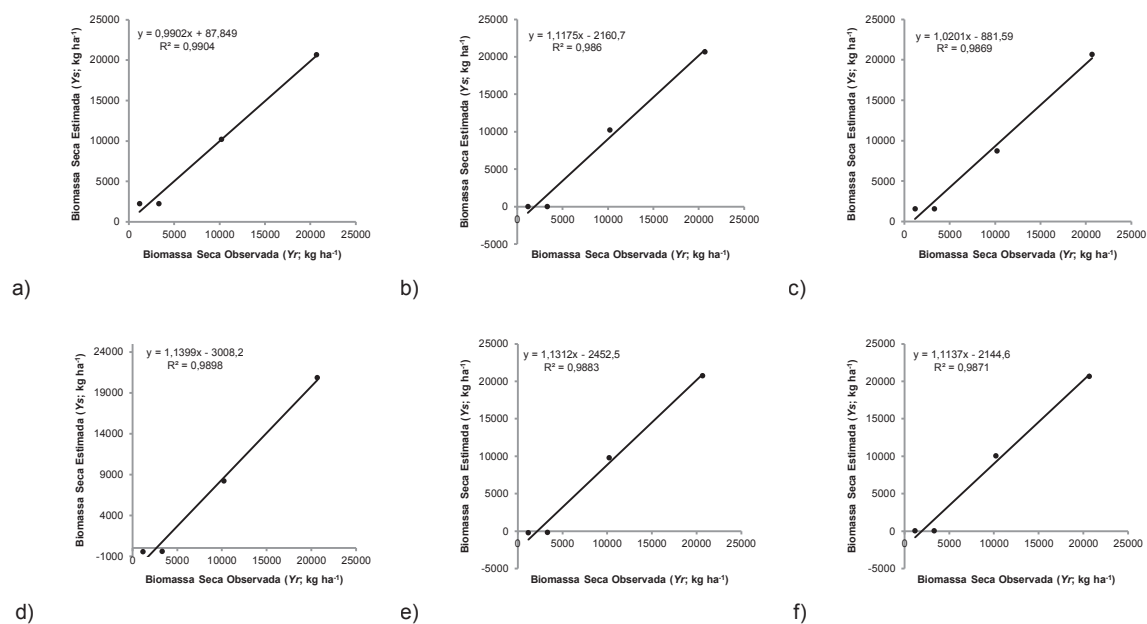
FONTE: O autor (2019).

FIGURA A2.11 – REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) ENTRE BIOMASSA SECA ESTIMADA (Y_s) vs OBSERVADA (Y_r) DA SAFRA “PONTA GROSSA 2007/2008” DA CULTURA MILHO, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, TENDO RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE ACUMULADA (R_s) COMO VARIÁVEIS DE ENTRADA NA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS MODELOS: a) STREIBIG (1988); b) GOMPERTZ E PHILOS (1825); c) RATKOWSKY (1983); d) BRODY (1945); e) BERTALANFFY (1957); E, f) GARCIA E GARCIA (2002)



FONTE: O autor (2019).

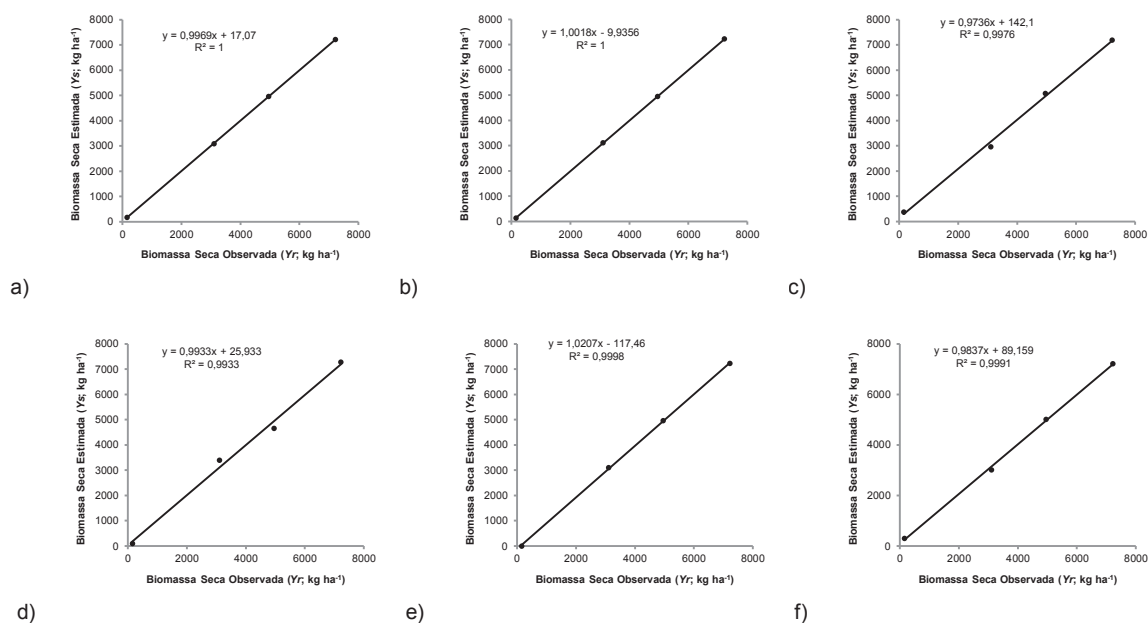
FIGURA A2.12 – REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) ENTRE BIOMASSA SECA ESTIMADA (Y_s) vs OBSERVADA (Y_r) DA SAFRA “PONTA GROSSA 2007/2008” DA CULTURA MILHO, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, TENDO PRECIPITAÇÃO ACUMULADA (P) COMO VARIÁVEIS DE ENTRADA NA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS MODELOS: a) STREIBIG (1988); b) GOMPERTZ E PHILOS (1825); c) RATKOWSKY (1983); d) BRODY (1945); e) BERTALANFFY (1957); E, f) GARCIA E GARCIA (2002)



FONTE: O autor (2019).

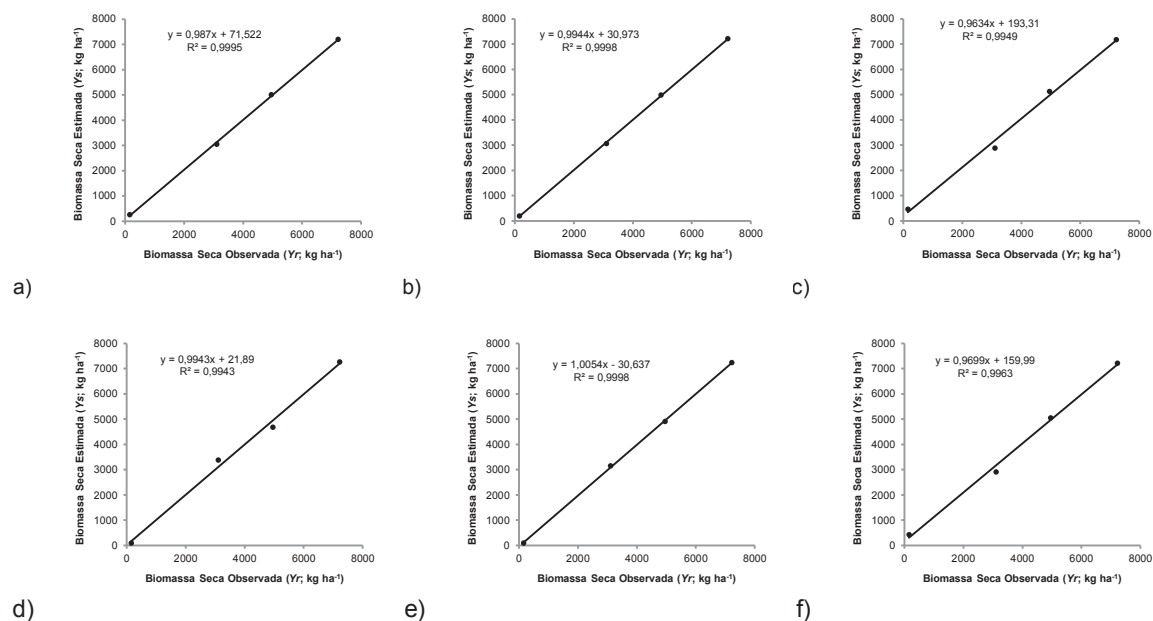
APÊNDICE 3 – REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) ENTRE BIOMASSA SECA ESTIMADA (Y_s) vs OBSERVADA (Y_r) NAS SAFRAS UTILIZADAS PARA CALIBRAÇÃO DA CULTURA TRIGO, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS.

FIGURA A3.1 – REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) ENTRE BIOMASSA SECA ESTIMADA (Y_s) vs OBSERVADA (Y_r) DA SAFRA “CASTRO 2007” DA CULTURA TRIGO, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, TENDO DIAS APÓS O PLANTIO (DAP) COMO VARIÁVEIS DE ENTRADA NA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS MODELOS: a) STREIBIG (1988); b) GOMPERTZ E PHILOS (1825); c) RATKOWSKY (1983); d) BRODY (1945); e) BERTALANFFY (1957); E, f) GARCIA E GARCIA (2002)



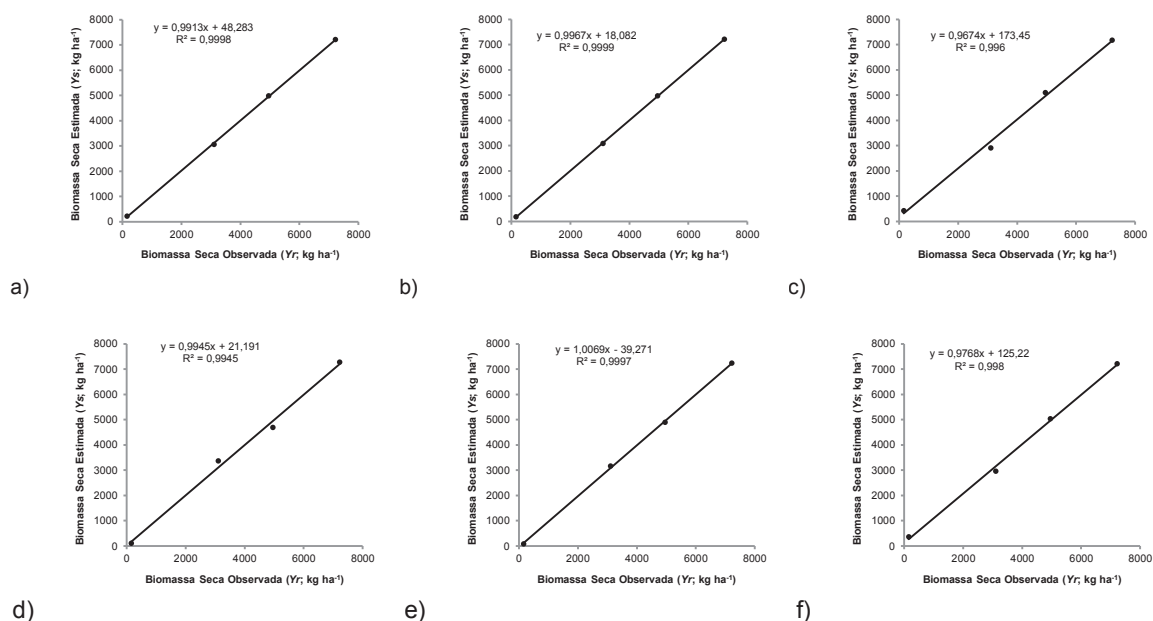
FONTE: O autor (2019).

FIGURA A3.2 – REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) ENTRE BIOMASSA SECA ESTIMADA (Y_s) vs OBSERVADA (Y_r) DA SAFRA “CASTRO 2007” DA CULTURA TRIGO, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, TENDO GRAUS DIAS ACUMULADOS (GDA) COMO VARIÁVEIS DE ENTRADA NA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS MODELOS: a) STREIBIG (1988); b) GOMPERTZ E PHILOS (1825); c) RATKOWSKY (1983); d) BRODY (1945); e) BERTALANFFY (1957); E, f) GARCIA E GARCIA (2002)



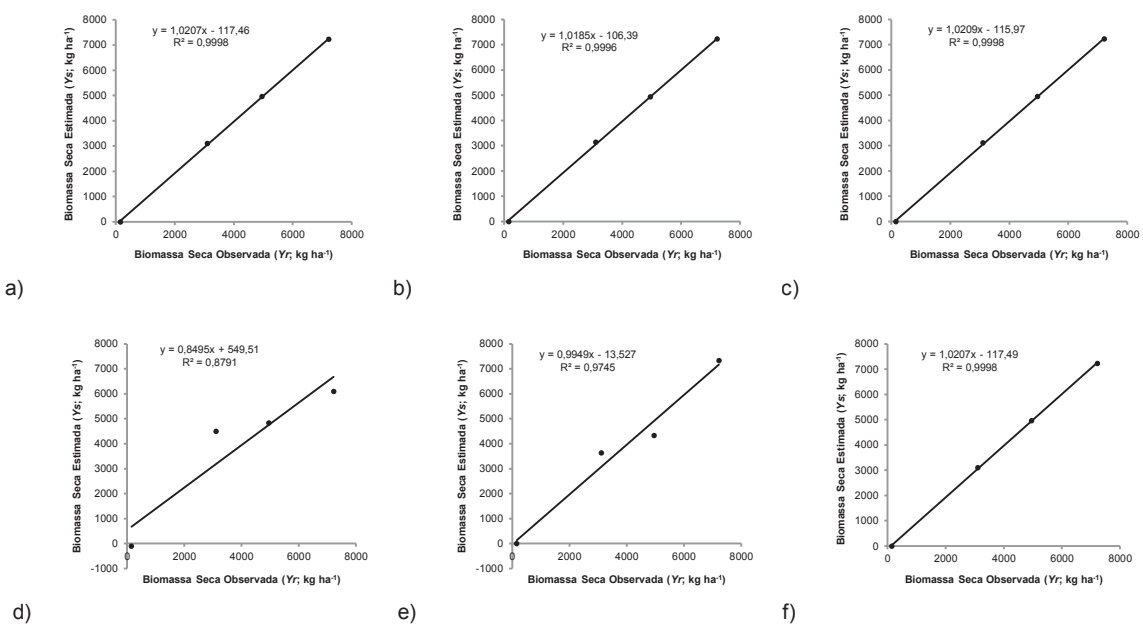
FONTE: O autor (2019).

FIGURA A3.3 – REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) ENTRE BIOMASSA SECA ESTIMADA (Y_s) vs OBSERVADA (Y_r) DA SAFRA “CASTRO 2007” DA CULTURA TRIGO, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, TENDO RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE ACUMULADA (R_s) COMO VARIÁVEIS DE ENTRADA NA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS MODELOS: a) STREIBIG (1988); b) GOMPERTZ E PHILOS (1825); c) RATKOWSKY (1983); d) BRODY (1945); e) BERTALANFFY (1957); E, f) GARCIA E GARCIA (2002)



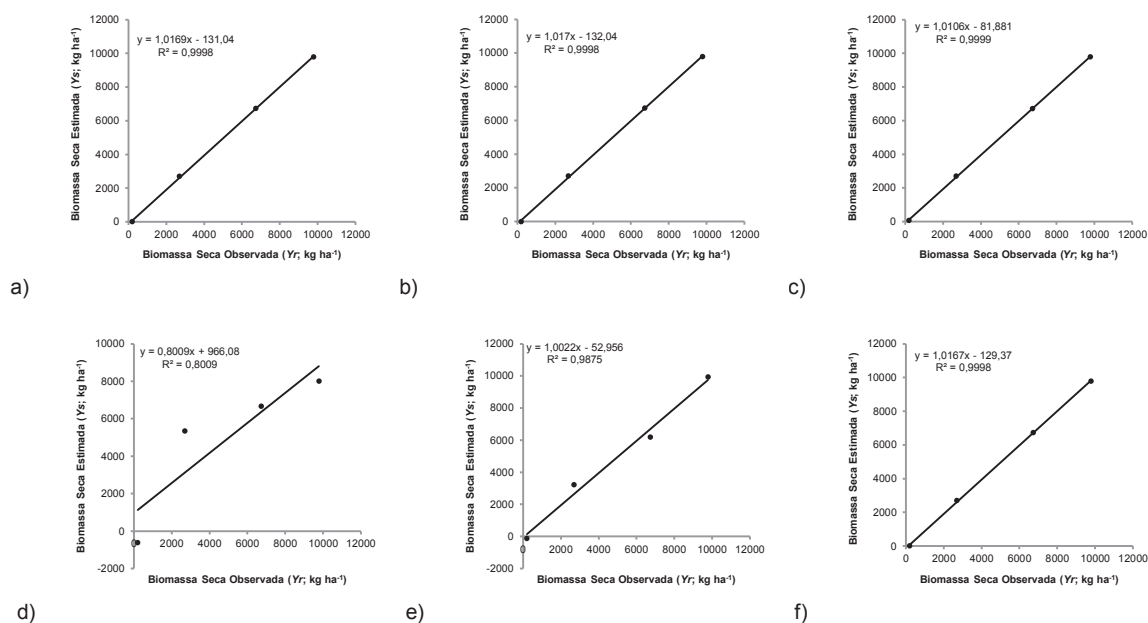
FONTE: O autor (2019).

FIGURA A3.4 – REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) ENTRE BIOMASSA SECA ESTIMADA (Y_s) vs OBSERVADA (Y_r) DA SAFRA “CASTRO 2007” DA CULTURA TRIGO, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, TENDO PRECIPITAÇÃO ACUMULADA (P) COMO VARIÁVEIS DE ENTRADA NA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS MODELOS: a) STREIBIG (1988); b) GOMPERTZ E PHILOS (1825); c) RATKOWSKY (1983); d) BRODY (1945); e) BERTALANFFY (1957); E, f) GARCIA E GARCIA (2002)



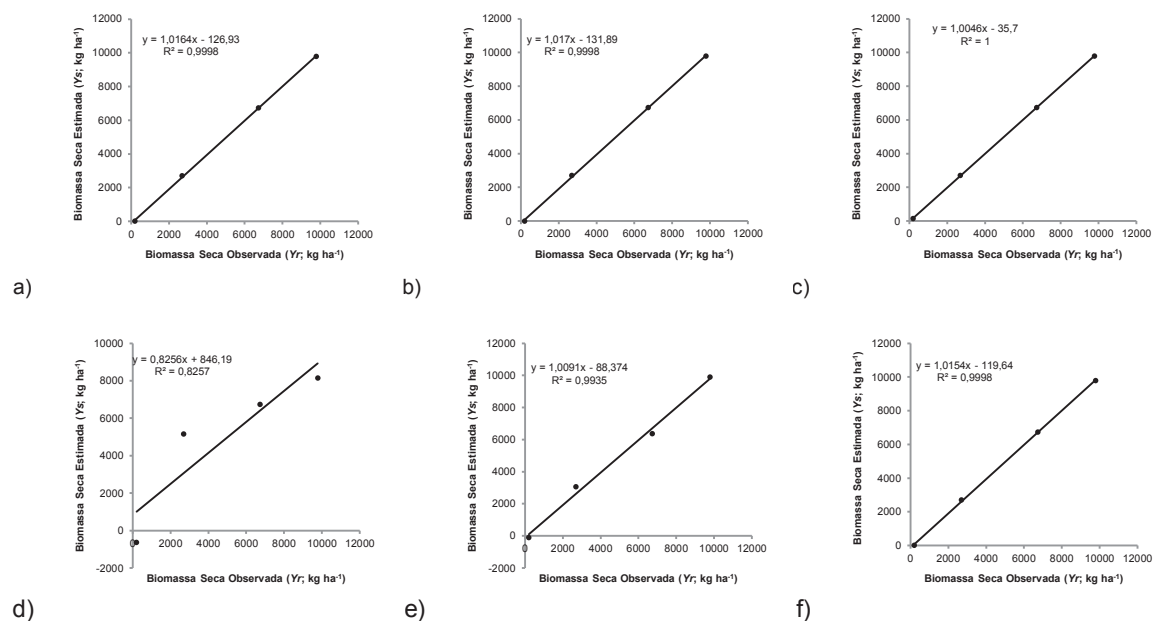
FONTE: O autor (2019).

FIGURA A3.5 – REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) ENTRE BIOMASSA SECA ESTIMADA (Y_s) vs OBSERVADA (Y_r) DA SAFRA “CASTRO 2008a” DA CULTURA TRIGO, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, TENDO DIAS APÓS O PLANTIO (DAP) COMO VARIÁVEIS DE ENTRADA NA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS MODELOS: a) STREIBIG (1988); b) GOMPERTZ E PHILOS (1825); c) RATKOWSKY (1983); d) BRODY (1945); e) BERTALANFFY (1957); E, f) GARCIA E GARCIA (2002)



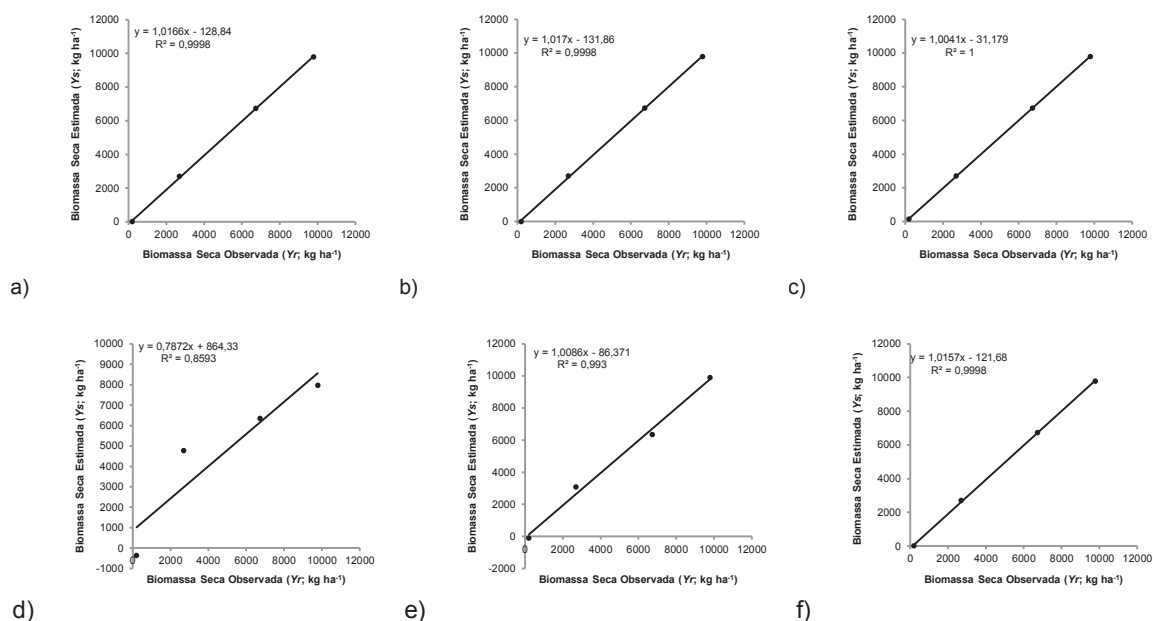
FONTE: O autor (2019).

FIGURA A3.6 – REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) ENTRE BIOMASSA SECA ESTIMADA (Y_s) vs OBSERVADA (Y_r) DA SAFRA “CASTRO 2008a” DA CULTURA TRIGO, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, TENDO GRAUS DIAS ACUMULADOS (GDA) COMO VARIÁVEIS DE ENTRADA NA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS MODELOS: a) STREIBIG (1988); b) GOMPERTZ E PHILOS (1825); c) RATKOWSKY (1983); d) BRODY (1945); e) BERTALANFFY (1957); E, f) GARCIA E GARCIA (2002)



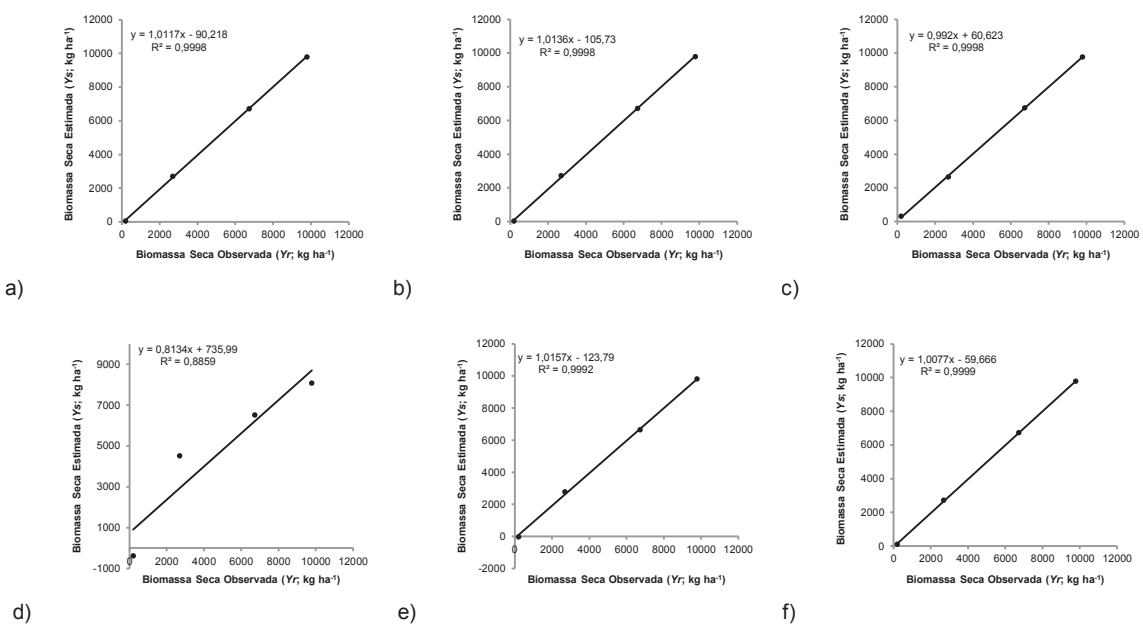
FONTE: O autor (2019).

FIGURA A3.7 – REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) ENTRE BIOMASSA SECA ESTIMADA (Y_s) vs OBSERVADA (Y_r) DA SAFRA “CASTRO 2008a” DA CULTURA TRIGO, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, TENDO RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE ACUMULADA (R_s) COMO VARIÁVEIS DE ENTRADA NA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS MODELOS: a) STREIBIG (1988); b) GOMPertz E PHILOS (1825); c) RATKOWSKY (1983); d) BRODY (1945); e) BERTALANFFY (1957); E, f) GARCIA E GARCIA (2002)



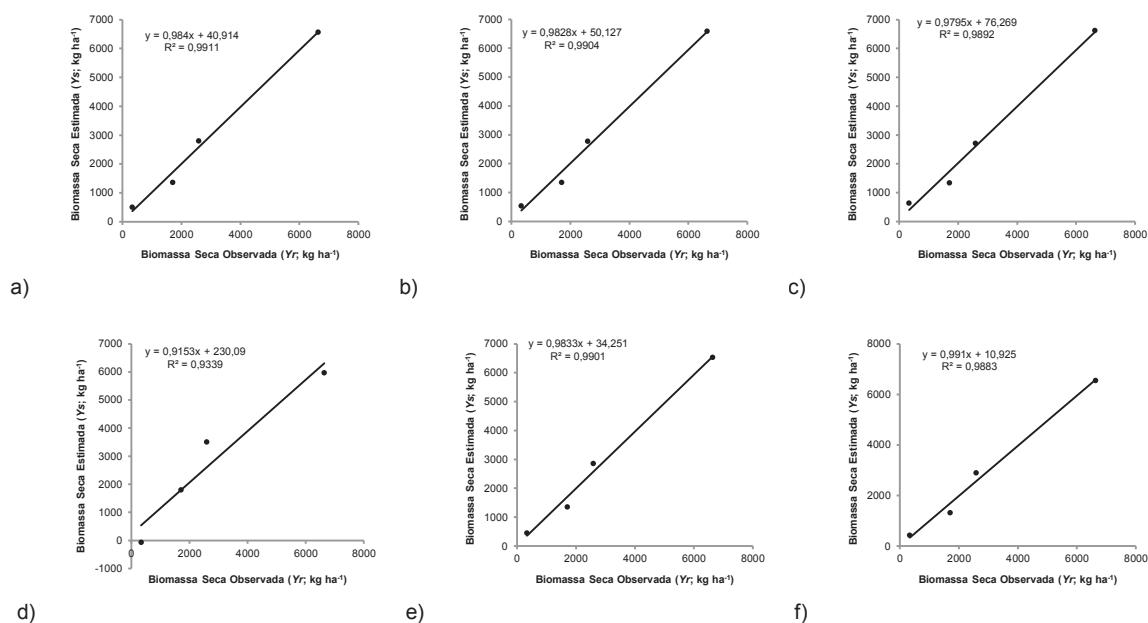
FONTE: O autor (2019).

FIGURA A3.8 – REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) ENTRE BIOMASSA SECA ESTIMADA (Y_s) vs OBSERVADA (Y_r) DA SAFRA “CASTRO 2008a” DA CULTURA TRIGO, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, TENDO PRECIPITAÇÃO ACUMULADA (P) COMO VARIÁVEIS DE ENTRADA NA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS MODELOS: a) STREIBIG (1988); b) GOMPertz E PHILOS (1825); c) RATKOWSKY (1983); d) BRODY (1945); e) BERTALANFFY (1957); E, f) GARCIA E GARCIA (2002)



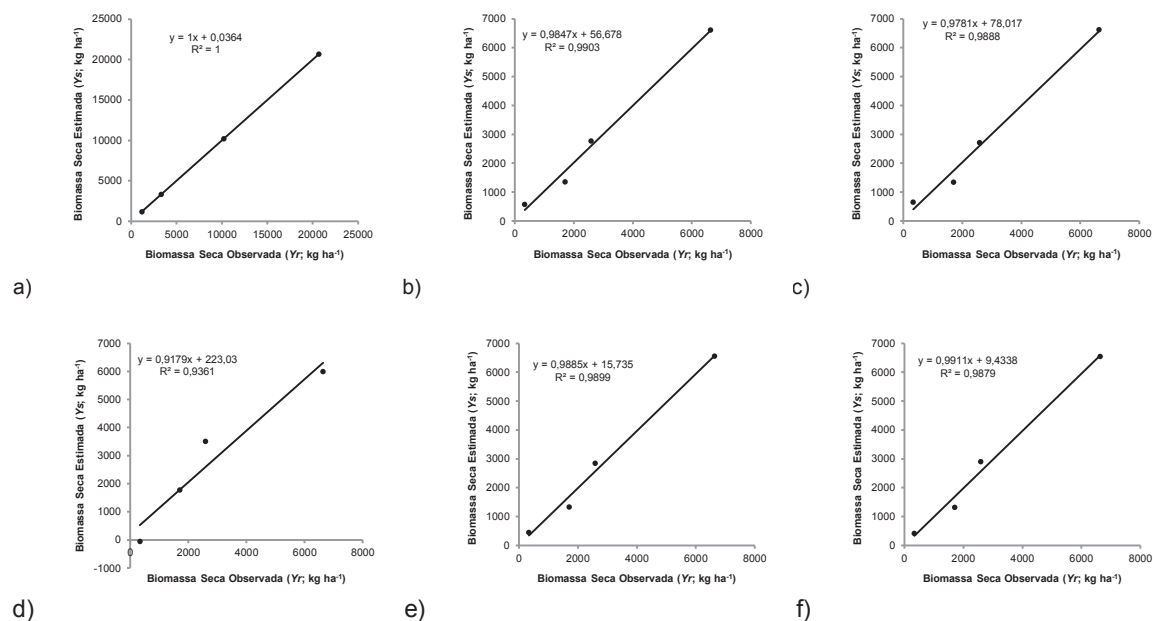
FONTE: O autor (2019).

FIGURA A3.9 – REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) ENTRE BIOMASSA SECA ESTIMADA (Y_s) vs OBSERVADA (Y_r) DA SAFRA “PONTA GROSSA 2008” DA CULTURA TRIGO, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, TENDO DIAS APÓS O PLANTIO (DAP) COMO VARIÁVEIS DE ENTRADA NA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS MODELOS: a) STREIBIG (1988); b) GOMPertz E PHILOS (1825); c) RATKOWSKY (1983); d) BRODY (1945); e) BERTALANFFY (1957); E, f) GARCIA E GARCIA (2002)



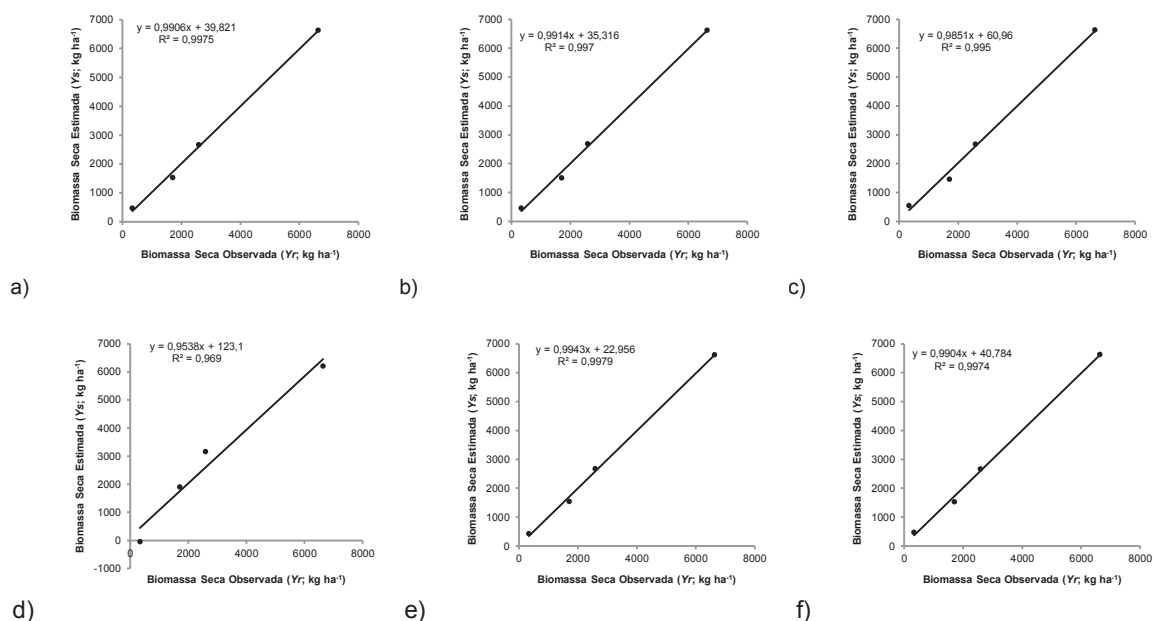
FONTE: O autor (2019).

FIGURA A3.10 – REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) ENTRE BIOMASSA SECA ESTIMADA (Y_s) vs OBSERVADA (Y_r) DA SAFRA “PONTA GROSSA 2008” DA CULTURA TRIGO, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, TENDO GRAUS DIAS ACUMULADOS (GDA) COMO VARIÁVEIS DE ENTRADA NA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS MODELOS: a) STREIBIG (1988); b) GOMPertz E PHILOS (1825); c) RATKOWSKY (1983); d) BRODY (1945); e) BERTALANFFY (1957); E, f) GARCIA E GARCIA (2002)



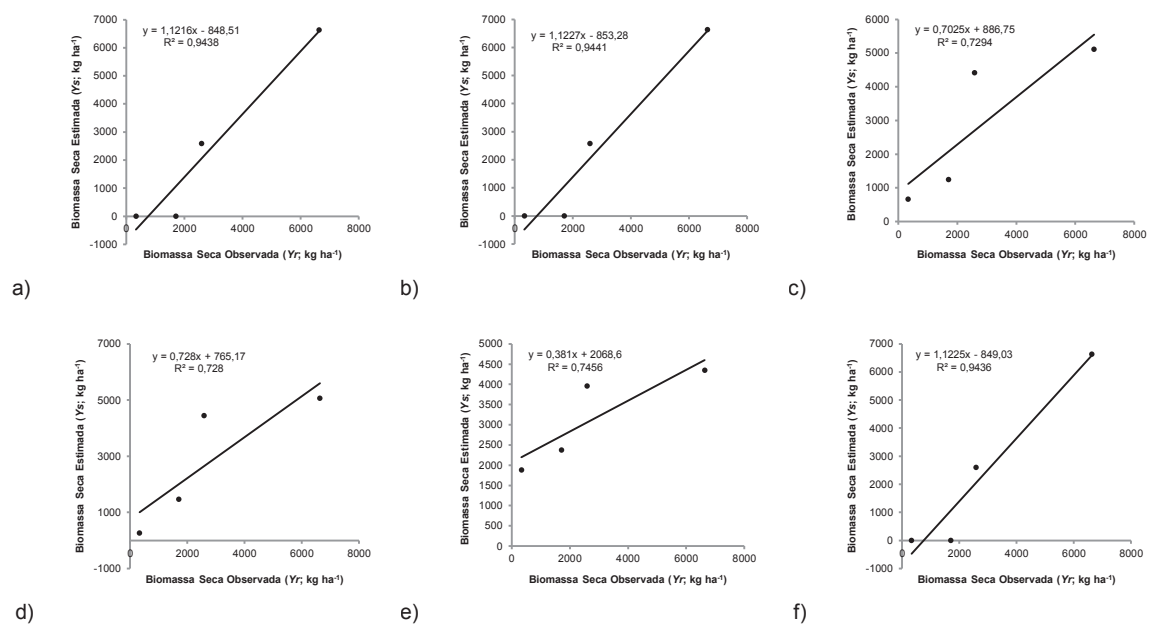
FONTE: O autor (2019).

FIGURA A3.11 – REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) ENTRE BIOMASSA SECA ESTIMADA (Y_s) vs OBSERVADA (Y_r) DA SAFRA “PONTA GROSSA 2008” DA CULTURA TRIGO, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, TENDO RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE ACUMULADA (R_s) COMO VARIÁVEIS DE ENTRADA NA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS MODELOS: a) STREIBIG (1988); b) GOMPertz E PHILOS (1825); c) RATKOWSKY (1983); d) BRODY (1945); e) BERTALANFFY (1957); E, f) GARCIA E GARCIA (2002)



FONTE: O autor (2019).

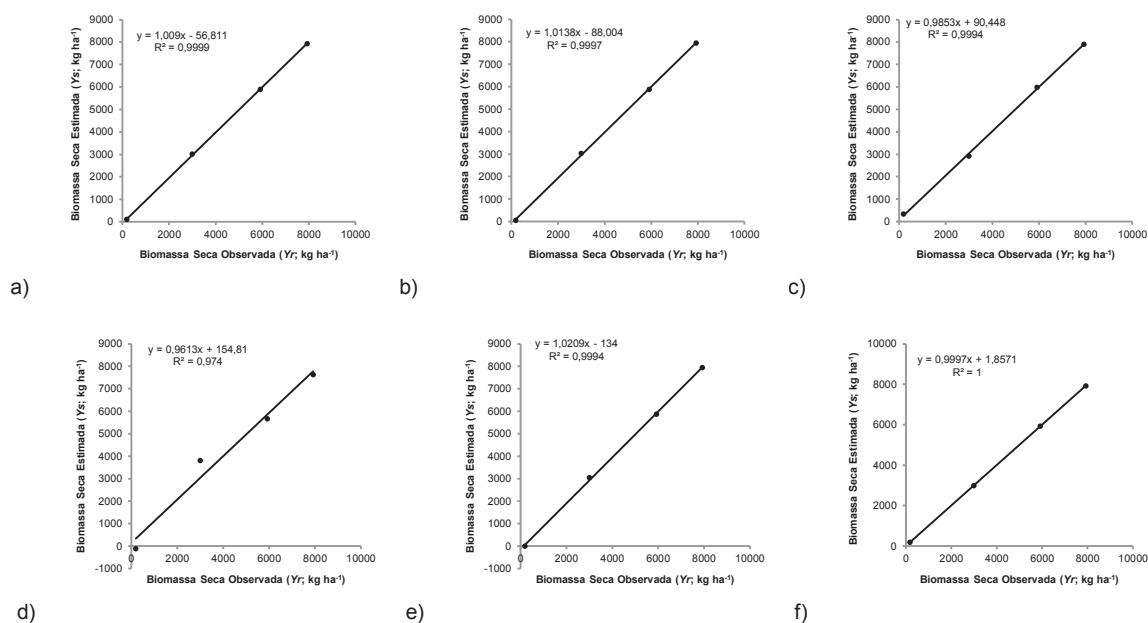
FIGURA A3.12 – REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) ENTRE BIOMASSA SECA ESTIMADA (Y_s) vs OBSERVADA (Y_r) DA SAFRA “PONTA GROSSA 2008” DA CULTURA TRIGO, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, TENDO PRECIPITAÇÃO ACUMULADA (P) COMO VARIÁVEIS DE ENTRADA NA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS MODELOS: a) STREIBIG (1988); b) GOMPertz E PHILOS (1825); c) RATKOWSKY (1983); d) BRODY (1945); e) BERTALANFFY (1957); E, f) GARCIA E GARCIA (2002)



FONTE: O autor (2019).

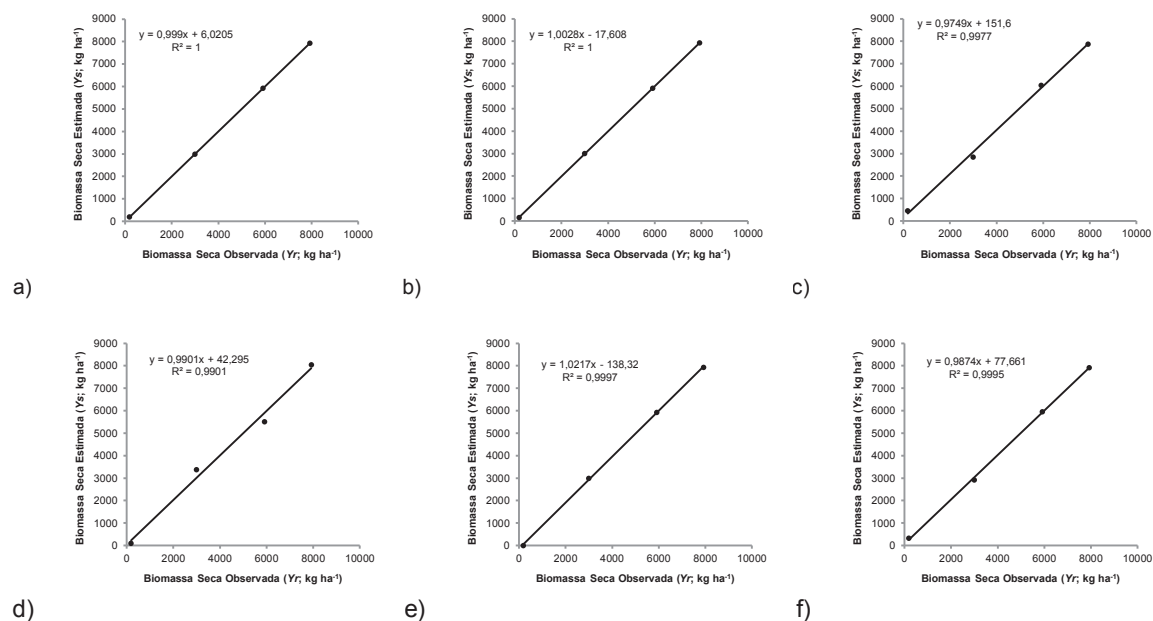
APÊNDICE 4 – REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) ENTRE BIOMASSA SECA ESTIMADA (Y_s) vs OBSERVADA (Y_r) NAS SAFRAS UTILIZADAS PARA CALIBRAÇÃO DA CULTURA CEVADA, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS.

FIGURA A4.1 – REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) ENTRE BIOMASSA SECA ESTIMADA (Y_s) vs OBSERVADA (Y_r) DA SAFRA “CASTRO 2007” DA CULTURA CEVADA, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, TENDO DIAS APÓS O PLANTIO (DAP) COMO VARIÁVEIS DE ENTRADA NA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS MODELOS: a) STREIBIG (1988); b) GOMPertz E PHILOS (1825); c) RATKOWSKY (1983); d) BRODY (1945); e) BERTALANFFY (1957); E, f) GARCIA E GARCIA (2002)



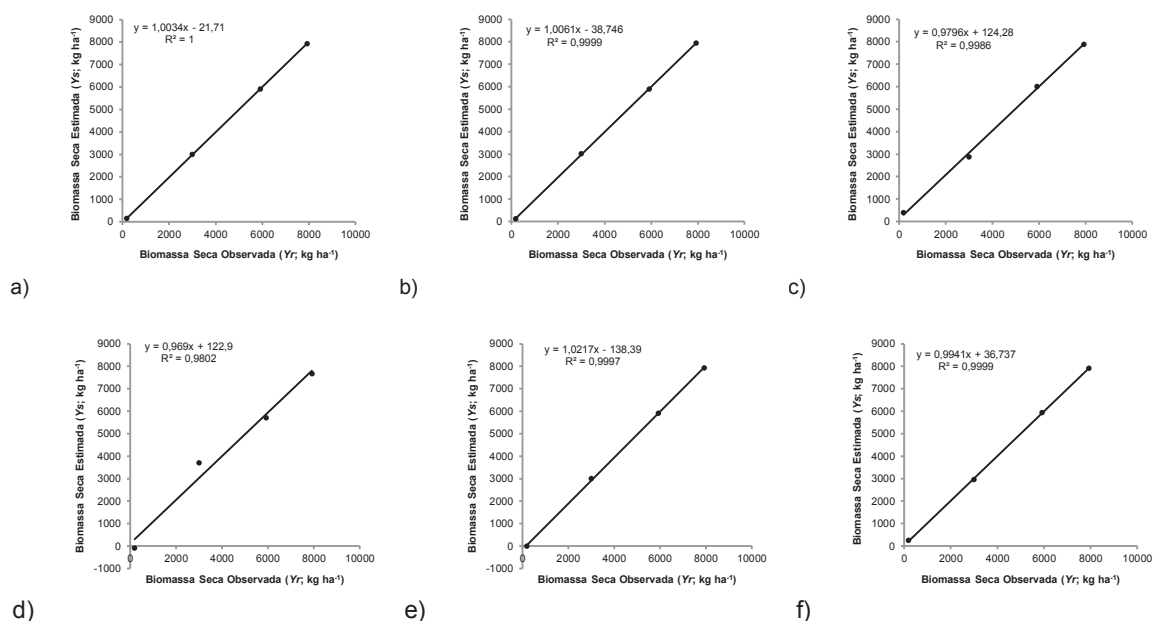
FONTE: O autor (2019).

FIGURA A4.2 – REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) ENTRE BIOMASSA SECA ESTIMADA (Y_s) vs OBSERVADA (Y_r) DA SAFRA “CASTRO 2007” DA CULTURA CEVADA, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, TENDO GRAUS DIAS ACUMULADOS (GDA) COMO VARIÁVEIS DE ENTRADA NA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS MODELOS: a) STREIBIG (1988); b) GOMPertz E PHILOS (1825); c) RATKOWSKY (1983); d) BRODY (1945); e) BERTALANFFY (1957); E, f) GARCIA E GARCIA (2002)



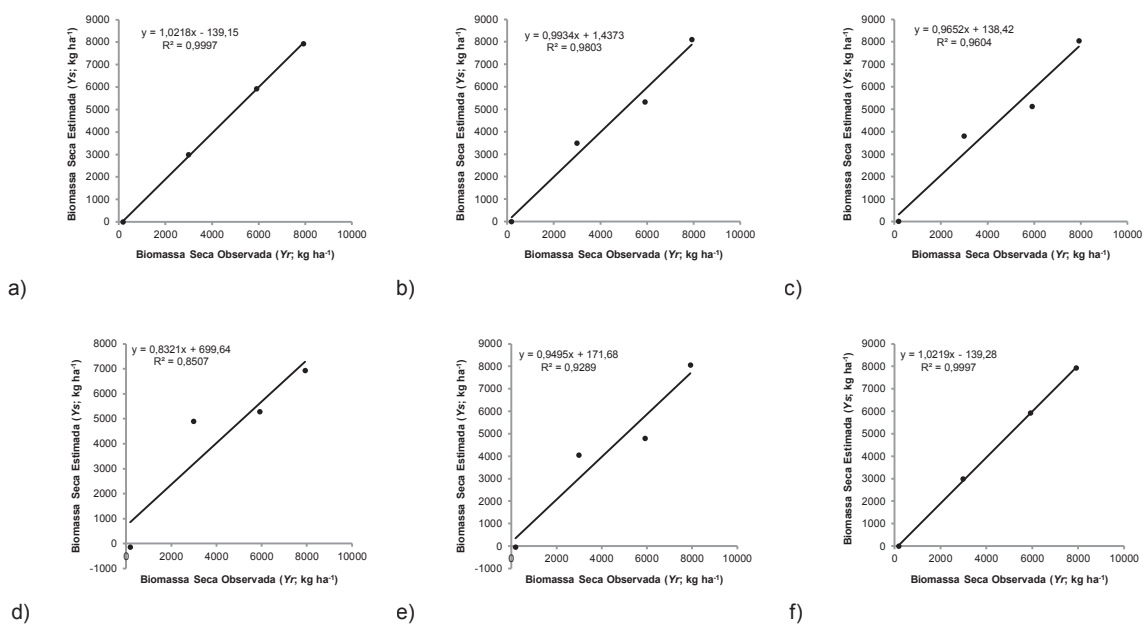
FONTE: O autor (2019).

FIGURA A4.3 – REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) ENTRE BIOMASSA SECA ESTIMADA (Y_s) vs OBSERVADA (Y_r) DA SAFRA “CASTRO 2007” DA CULTURA CEVADA, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, TENDO RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE ACUMULADA (R_s) COMO VARIÁVEIS DE ENTRADA NA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS MODELOS: a) STREIBIG (1988); b) GOMPERTZ E PHILOS (1825); c) RATKOWSKY (1983); d) BRODY (1945); e) BERTALANFFY (1957); E, f) GARCIA E GARCIA (2002)



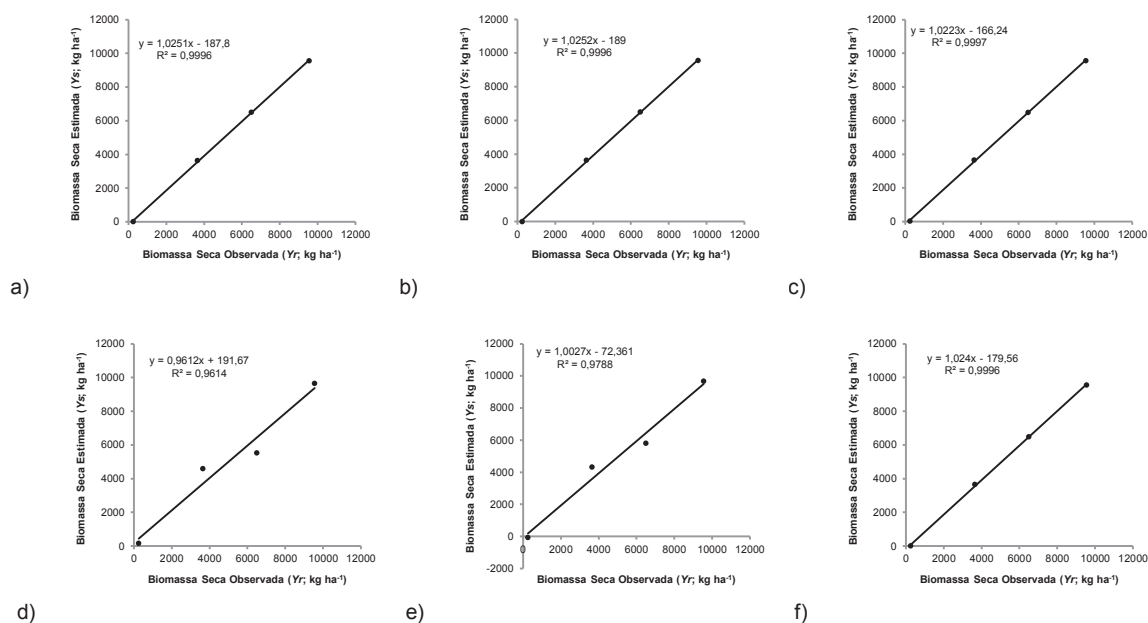
FONTE: O autor (2019).

FIGURA A4.4 – REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) ENTRE BIOMASSA SECA ESTIMADA (Y_s) vs OBSERVADA (Y_r) DA SAFRA “CASTRO 2007” DA CULTURA CEVADA, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, TENDO PRECIPITAÇÃO ACUMULADA (P) COMO VARIÁVEIS DE ENTRADA NA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS MODELOS: a) STREIBIG (1988); b) GOMPERTZ E PHILOS (1825); c) RATKOWSKY (1983); d) BRODY (1945); e) BERTALANFFY (1957); E, f) GARCIA E GARCIA (2002)



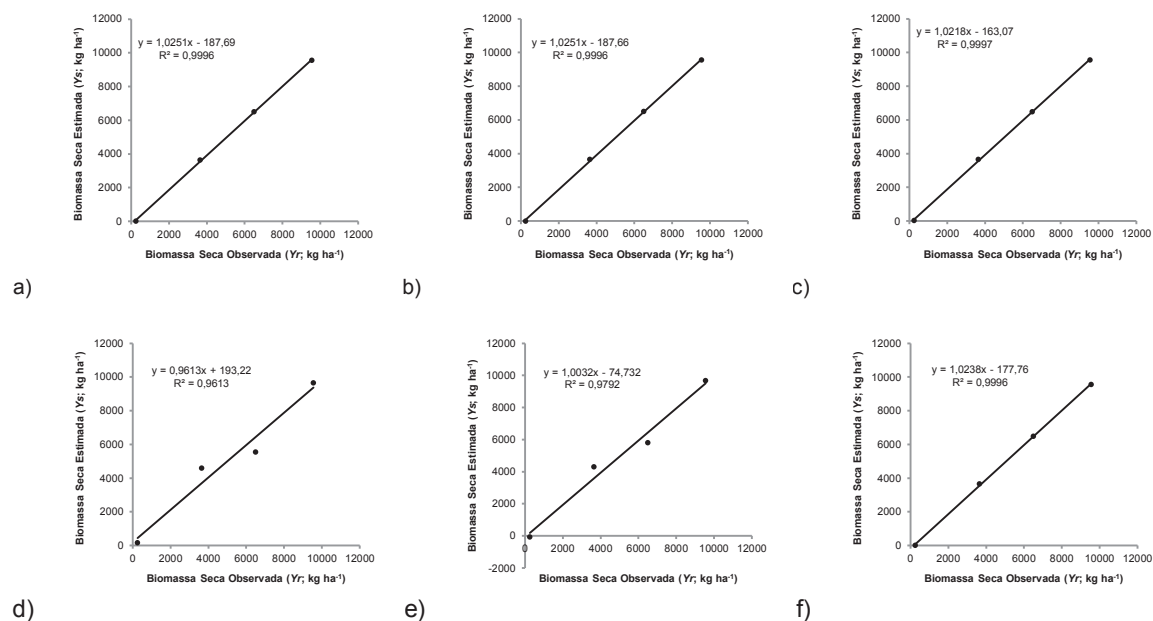
FONTE: O autor (2019).

FIGURA A4.5 – REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) ENTRE BIOMASSA SECA ESTIMADA (Y_s) vs OBSERVADA (Y_r) DA SAFRA “CASTRO 2008a” DA CULTURA CEVADA, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, TENDO DIAS APÓS O PLANTIO (DAP) COMO VARIÁVEIS DE ENTRADA NA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS MODELOS: a) STREIBIG (1988); b) GOMPERTZ E PHILOS (1825); c) RATKOWSKY (1983); d) BRODY (1945); e) BERTALANFFY (1957); E, f) GARCIA E GARCIA (2002)



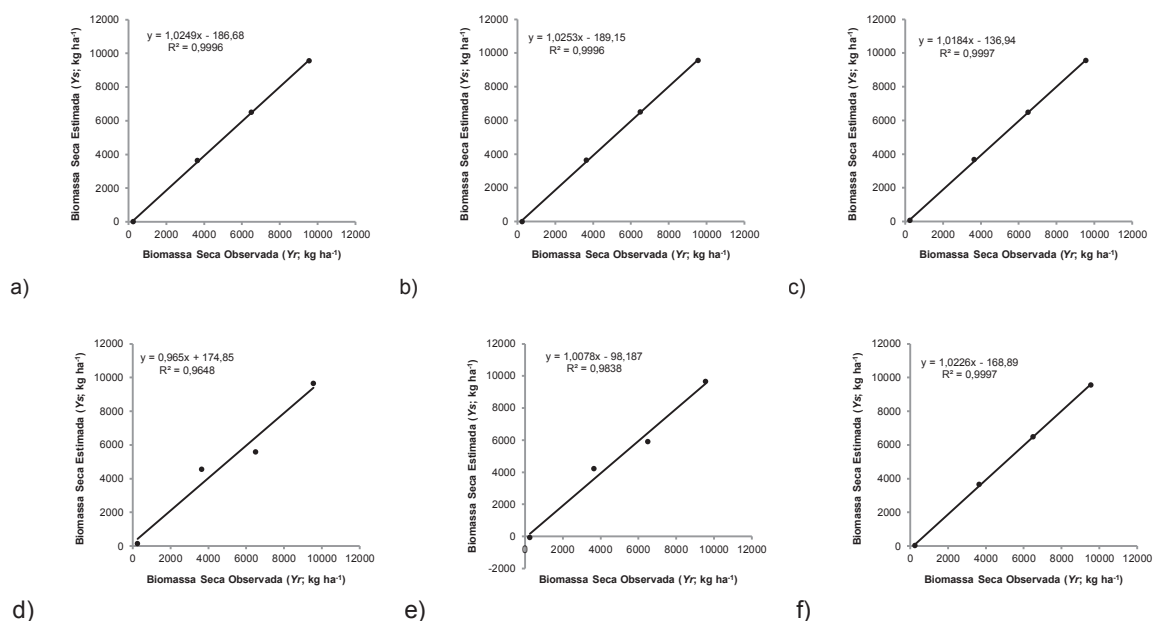
FONTE: O autor (2019).

FIGURA A4.6 – REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) ENTRE BIOMASSA SECA ESTIMADA (Y_s) vs OBSERVADA (Y_r) DA SAFRA “CASTRO 2008a” DA CULTURA CEVADA, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, TENDO GRAUS DIAS ACUMULADOS (GDA) COMO VARIÁVEIS DE ENTRADA NA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS MODELOS: a) STREIBIG (1988); b) GOMPERTZ E PHILOS (1825); c) RATKOWSKY (1983); d) BRODY (1945); e) BERTALANFFY (1957); E, f) GARCIA E GARCIA (2002)



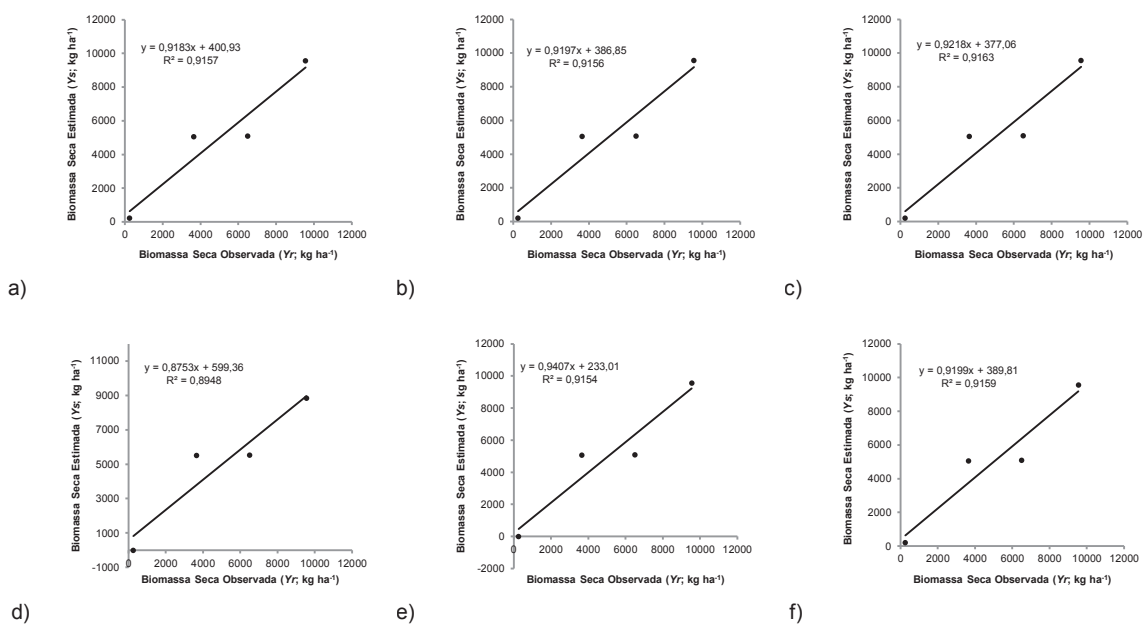
FONTE: O autor (2019).

FIGURA A4.7 – REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) ENTRE BIOMASSA SECA ESTIMADA (Y_s) vs OBSERVADA (Y_r) DA SAFRA “CASTRO 2008a” DA CULTURA CEVADA, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, TENDO RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE ACUMULADA (R_s) COMO VARIÁVEIS DE ENTRADA NA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS MODELOS: a) STREIBIG (1988); b) GOMPERTZ E PHILOS (1825); c) RATKOWSKY (1983); d) BRODY (1945); e) BERTALANFFY (1957); E, f) GARCIA E GARCIA (2002)



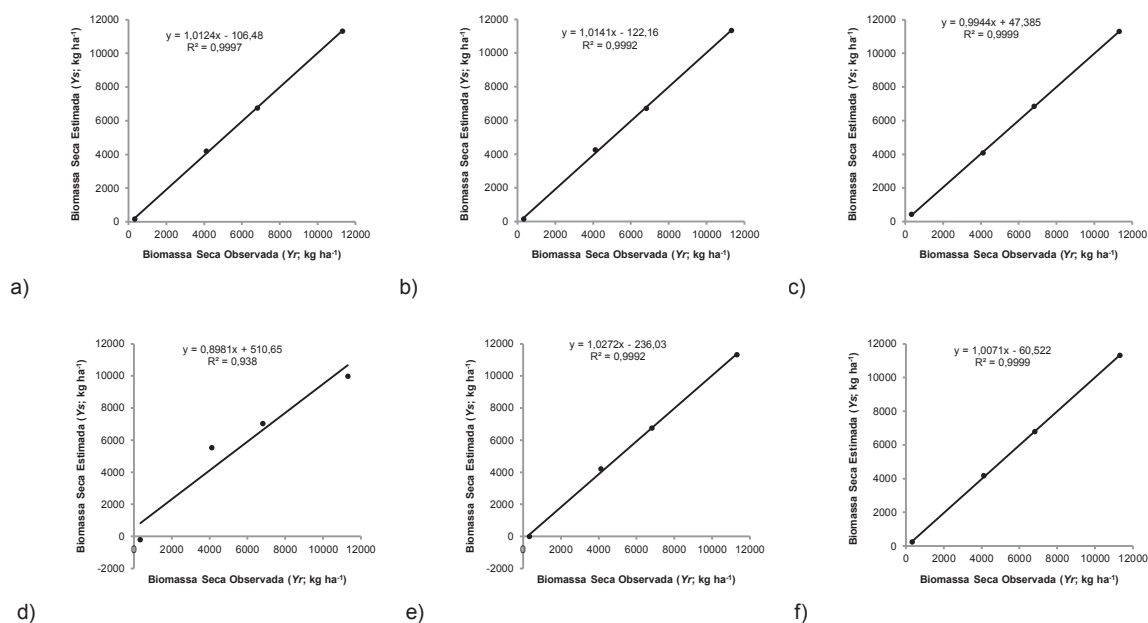
FONTE: O autor (2019).

FIGURA A4.8 – REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) ENTRE BIOMASSA SECA ESTIMADA (Y_s) vs OBSERVADA (Y_r) DA SAFRA “CASTRO 2008a” DA CULTURA CEVADA, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, TENDO PRECIPITAÇÃO ACUMULADA (P) COMO VARIÁVEIS DE ENTRADA NA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS MODELOS: a) STREIBIG (1988); b) GOMPERTZ E PHILOS (1825); c) RATKOWSKY (1983); d) BRODY (1945); e) BERTALANFFY (1957); E, f) GARCIA E GARCIA (2002)



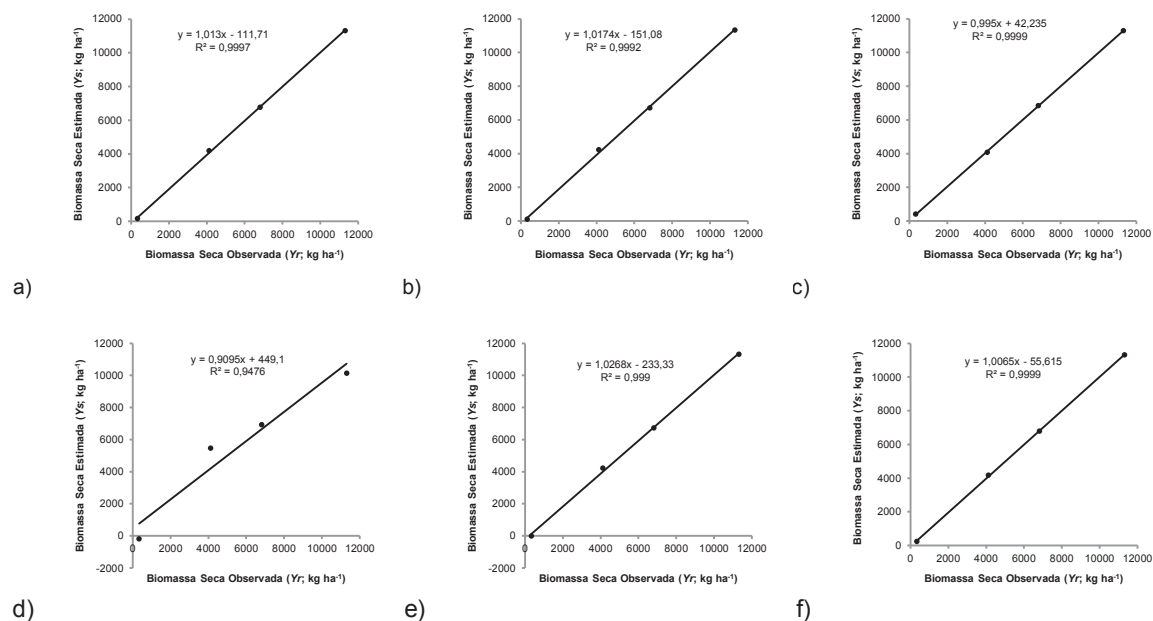
FONTE: O autor (2019).

FIGURA A4.9 – REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) ENTRE BIOMASSA SECA ESTIMADA (Y_s) vs OBSERVADA (Y_r) DA SAFRA “PONTA GROSSA 2008a” DA CULTURA CEVADA, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, TENDO DIAS APÓS O PLANTIO (DAP) COMO VARIÁVEIS DE ENTRADA NA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS MODELOS: a) STREIBIG (1988); b) GOMPERTZ E PHILOS (1825); c) RATKOWSKY (1983); d) BRODY (1945); e) BERTALANFFY (1957); E, f) GARCIA E GARCIA (2002)



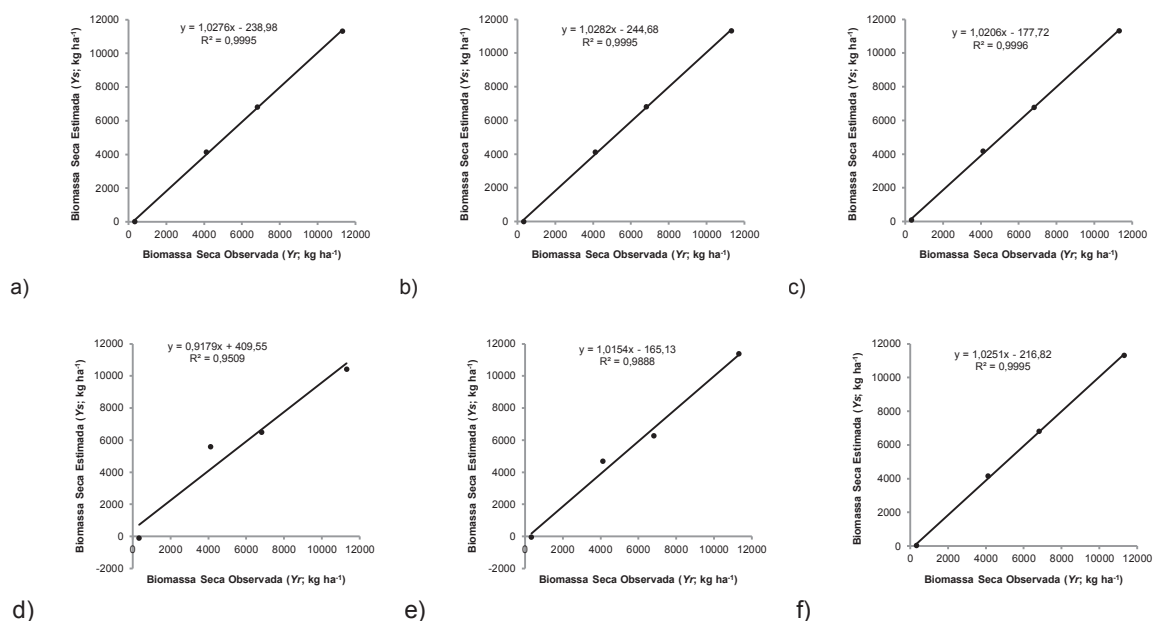
FONTE: O autor (2019).

FIGURA A4.10 – REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) ENTRE BIOMASSA SECA ESTIMADA (Y_s) vs OBSERVADA (Y_r) DA SAFRA “PONTA GROSSA 2008a” DA CULTURA CEVADA, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, TENDO GRAUS DIAS ACUMULADOS (GDA) COMO VARIÁVEIS DE ENTRADA NA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS MODELOS: a) STREIBIG (1988); b) GOMPERTZ E PHILOS (1825); c) RATKOWSKY (1983); d) BRODY (1945); e) BERTALANFFY (1957); E, f) GARCIA E GARCIA (2002)



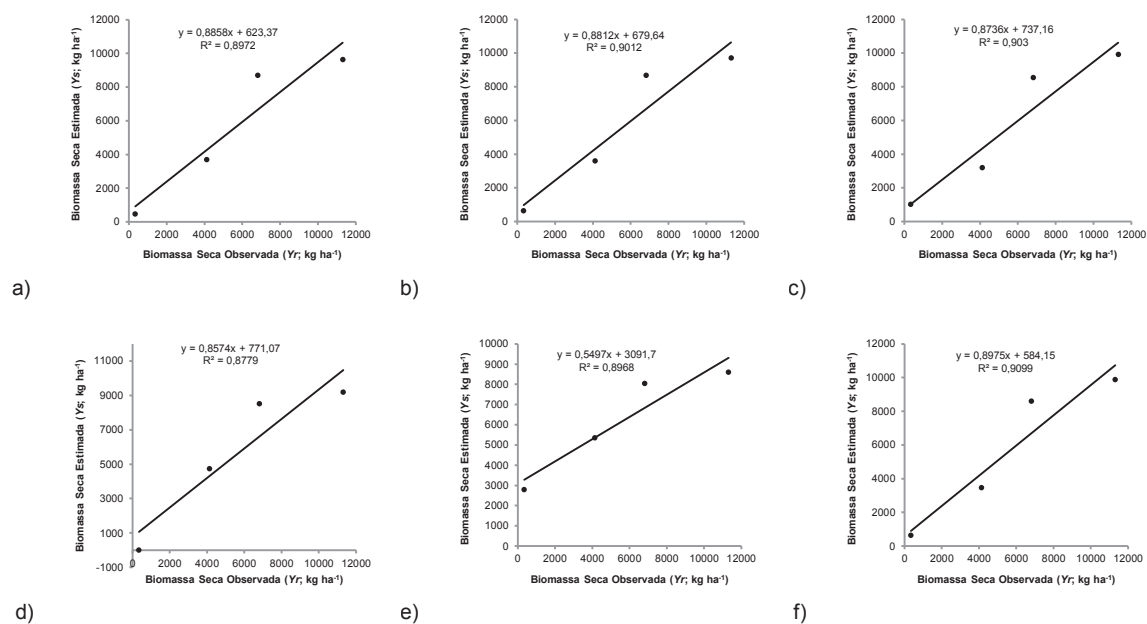
FONTE: O autor (2019).

FIGURA A4.11 – REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) ENTRE BIOMASSA SECA ESTIMADA (Y_s) vs OBSERVADA (Y_r) DA SAFRA “PONTA GROSSA 2008a” DA CULTURA CEVADA, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, TENDO RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE ACUMULADA (R_s) COMO VARIÁVEIS DE ENTRADA NA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS MODELOS: a) STREIBIG (1988); b) GOMPERTZ E PHILOS (1825); c) RATKOWSKY (1983); d) BRODY (1945); e) BERTALANFFY (1957); E, f) GARCIA E GARCIA (2002)



FONTE: O autor (2019).

FIGURA A4.12 – REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) ENTRE BIOMASSA SECA ESTIMADA (Y_s) vs OBSERVADA (Y_r) DA SAFRA “PONTA GROSSA 2008a” DA CULTURA CEVADA, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, TENDO PRECIPITAÇÃO ACUMULADA (P) COMO VARIÁVEIS DE ENTRADA NA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS MODELOS: a) STREIBIG (1988); b) GOMPERTZ E PHILOS (1825); c) RATKOWSKY (1983); d) BRODY (1945); e) BERTALANFFY (1957); E, f) GARCIA E GARCIA (2002)



FONTE: O autor (2019).